STIINTA PENTRU TOTI
28

DORIN RĂDULESCU
STELIAN MINOIU
EMIL STAN

Introducere în teoria sistemelor

Știința pentru toți

Cunoștințe tehnico-profesionale

COLECȚIA „ȘTIINȚA PENTRU TOȚI"
apare sub egida
CONSILIULUI NAȚIONAL
AL
FRONTULUI UNITĂȚII SOCIALISTE

DORIN RĂDULESCU
STELIAN MINOIU
EMIL STAN

Introducere în teoria sistemelor

EDITURA ȘTIINȚIFICĂ ȘI ENCICLOPEDICĂ
București, 1978

Coperta colecției: KERRY EUGEN

Redactor: ing. VASILE VĂCARU

Tehnoredactor: MARILENA DAMASCHINOPOL

1. CE ESTE TEORIA SISTEMELOR?

1.1. Originile teoriei sistemelor

Identificarea de către om a realității ca ansamblu de obiecte care interacționează, perceperea mediului înconjurător apropiat sau depărtat ca multitudine de sisteme și, mai ales, cunoașterea structurii și mecanismelor de comportare ale acestor sisteme au parcurs drumul spinos și eroic al tuturor marilor cuceriri științifice. Deși nu putem vorbi despre un moment al nașterii teoriei sistemelor, nu putem nici afirma că ea a existat dintotdeauna — măcar în germene — epoca prezentă consemnîndu-i doar dezvoltarea deosebită și amploarea impactului asupra tehnicii, economiei sau științelor sociale. Într-adevăr, imaginile sistemice pe care le construiesc astăzi științele tehnice, economice, științele naturii, societății și omului nu puteau să apară înainte de a fi fost parcurse mari etape ale dezvoltării gîndirii umane:

1. *Acreditarea ideilor ateiste și materialist-dialectice potrivit cărora evoluția lucrurilor nu este dinainte și definitiv determinată de o forță supranaturală care domină toate legăturile cauză-efect.* Este evident că acceptarea unei cauzalități încărcate de supranatural implica ideea „zădărniciei" încercărilor de a înțelege și de a interveni activ asupra unor relații

cauzale. Elucidarea noțiunilor de întîmplare, necesitate, cauzalitate în cadrul materialismului dialectic a condus, dimpotrivă, la prăbușirea concepțiilor agnosticiste care se opuneau înțelegerii științifice a fenomenelor naturii, a proprietăților obiectelor sau a determinării unor fenomene de către altele. Cu toate acestea, deși fundamentările materialist-dialectice ale teoriei sistemelor sînt în afara oricărei discuții, anumite aspecte teoretice ale acesteia suscită încă interpretări idealiste.

2. *Perfecționarea tehnicilor experimentale în știință și acumularea puternică de date experimentale și teorii explicative.* Pe această cale s-au putut explica dependențe cauzale manifestate pe întinderi de spațiu și timp foarte mari sau foarte mici, imposibil de detectat cu ajutorul simțurilor și la nivelul timpului biologic. De exemplu, cînd s-a observat că furtunile magnetice solare induc perturbări în cîmpul magnetic terestru, a fost pus în evidență un sistem cu două elemente (cîmp magnetic solar, cîmp magnetic terestru) care interacționează într-un mod specific.

3. *Progresul aparatului conceptual și teoretic al unor științe.* Pînă la apariția teoriei relativității se postula independența reciprocă a spațiului și timpului. Teoria relativității a demonstrat că ele sînt reciproc dependente și a definit modul de dependență scoțînd în relief existența unui *sistem spațiu-timp.* Alt exemplu: în economia politică premarxistă nu au fost explicate noțiunile de „forțe de producție" și „relații de producție" fiind, evident, ignorată și condiționarea lor reciprocă. Arătînd că între acestea trebuie să existe o concordanță (lipsa acesteia conducînd la modificarea în salt a relațiilor de producție pînă la restabilirea concordanței cu nivelul de dezvoltare a forțelor de producție), Karl Marx a

identificat *un sistem,* stabilind nu numai interdependența celor două elemente, ci și modul lor specific de a interacționa.

4. *Dezvoltarea unui aparat matematic capabil să descrie sub formă abstractă, structura, proprietățile și comportamentul unor obiecte și sisteme din ce în ce mai complexe.* O dată cu identificarea unor sisteme în realitatea înconjurătoare, a apărut necesitatea ca ele să poată fi descrise în termenii unor relații cît mai exact reprezentate. Fizica și tehnica, indeosebi, au evidențiat necesitatea ca relațiile între elementele unui sistem să fie descrise nu numai sub forma „cu cît crește x, scade y și crește z", ci și cu o exactitate cît mai mare și o valoare de adevăr cît mai extinsă.

Fizica, mai ales, a fost preocupată de descoperirea unor relații între obiecte, cu valabilitate cît mai generală și invariante în timp. „Cucerirea fizicii de către spiritul matematic" — remarcată cu acuitate de către V. I. Lenin — reprezenta tocmai această nevoie de a identifica adevăruri oricînd demonstrabile despre latura cantitativă și calitativă a relațiilor dintre obiecte. Aceste adevăruri au fost numite „legi ale fizicii", încadrîndu-se în legile naturii care, după excelenta definiție a lui A. Feldbaum[1], sînt „propoziții cu caracter restrictiv, delimitînd într-un anumit domeniu posibilul de imposibil".

Un exemplu îl reprezintă legea lui Ohm: $I = \frac{U}{R}$ care arată că intensitatea I a curentului într-un circuit este proporțională cu tensiunea U și invers proporțională cu rezistența R. Dezvoltarea teoriei ecuațiilor diferențiale și a calculului operațional, de

[1] A. FELDBAUM, *„Principes théoriques des systèmes asservis optimaux"*, Editions Mir-Moscou, 1973.

exemplu, a permis descrierea exactă a comportării dinamice (în timp) a unor sisteme complexe și a fundamentat calculul sistemelor automate. Apariția teoriei informației (Claude Shannon, 1948) a făcut posibilă analiza și calculul sistemelor de telecomunicații. Calculul operațional și programarea matematică au deschis drumul exprimării cantitative a interacțiunii dintre elementele unui sistem tehnic sau economic, și, mai mult, au creat posibilitatea de a găsi, pentru un sistem dat, modul optim de interacțiune adică modul de a ridica performanțele sistemului. Alte capitole ale matematicii, teoria mulțimilor, logica matematică, algebra abstractă au evidențiat în mod special faptul că sisteme cu o natură fizică foarte diferită pot fi descrise cu aceleași instrumente de formalizare.

Astfel, oscilația amortizată a unui pendul, descărcarea unui condensator electric printr-o inductanță și echilibrarea dintre cerere și ofertă pe piața liberă au aceeași evoluție în timp (fig. 1) și pot fi descrise de aceeași ecuație:

$$x(t) = Ae^{-at} \sin(\omega t + \varphi) \qquad (1.1)$$

în care:

$x(t)$ = { unghiul făcut de pendul cu verticala; tensiunea la bornele condensatorului; diferența dintre cerere și ofertă }

A = constantă de proporționalitate { unghiul de la care începe oscilația pendulului; tensiunea maximă la bornele condensatorului; diferența maximă între cerere și ofertă }

a = constantă de amortizare

ω = perioada de oscilație a sistemului

φ = unghi determinat de condițiile inițiale.

Vom reține observația că, în funcție de sistemul considerat (pendul, condensator, piață) variabila dependentă (sau *starea sistemului)* are diferite semnificații, după cum și constantele care intervin se deo-

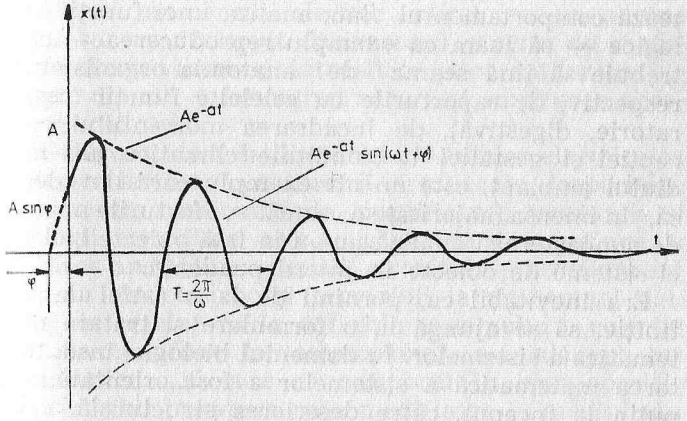


Fig. 1.

sebesc prin natura lor. Dar evoluția lor în timp și ecuația care descrie evoluția sînt identice.

Vedem deci că, dacă teoriei sistemelor nu i se poate atribui o dată de naștere, putem, în schimb, să definim condițiile care i-au făcut posibilă apariția. Alături de aceste *condiții* este util să situăm *rădăcinile* teoriei sistemelor.

1. *Biologia* este, în mod cert, una din aceste rădăcini, iar Ludwig von Bertalanffy este primul care folosește noțiunea de sistem — definit ca o mulțime de „obiecte" $\Omega_1, \Omega_2, \ldots, \Omega_n$ care interacționează — și o ridică la rangul de metodă de analiză a entităților biologice. Este ușor de înțeles că studiul biosferei trebuia să fi condus mai devreme sau mai tîr-

ziu la ideea că un sistem ecologic în care interacţionează specii biologice, factori climatici şi fizico-geografici nu permite izolarea unuia din obiectele sale (o specie, de exemplu) şi studiul complet al acestuia în absenţa celorlalte obiecte care îi influenţează comportamentul. Sau, analiza unei funcţii biologice — să luăm ca exemplu reproducerea — care trebuie să ţină seama de anatomia organismului respectiv, de raporturile cu celelalte funcţii (respiratorie, digestivă), de încadrarea momentului concepţiei şi gestaţiei în condiţiile climatice ale mediului ambiant, este un alt exemplu care dovedeşte că, în imensa majoritate a cazurilor, eforturile noastre de cunoaştere şi analiză nu au în faţă obiecte izolate, ci sisteme de obiecte în interdependenţă.

Era inevitabil ca, pornind de la o astfel de definiţie, să se ajungă la o formulare şi tratare matematică a sistemelor. În domeniul biologic, însă, tratarea matematică a sistemelor a fost orientată, cel puţin la început, către descrierea structurală, calitativă a sistemelor şi, mai puţin, către explicitarea laturii cantitative.

2. *Teoria circuitelor*, dezvoltată ca urmare a evoluţiei rapide a electronicii constituie o altă rădăcină a teoriei sistemelor, avînd o contribuţie caracteristică la evoluţia acesteia. Fiind orientată către realizarea de aparatură şi dispozitive de telecomunicaţii, electronica — în fazele ei de debut — a fost confruntată cu necesitatea unor metode de proiectare cu o precizie ridicată. Acest fapt a dus la naşterea teoriei circuitelor care are ca principal obiect calculul elementelor unui circuit electric în condiţiile unor funcţii şi performanţe impuse (de exemplu: amplificarea şi demodularea oscilaţiilor electromagnetice propagate şi captate prin antene precum şi traducerea lor ca oscilaţii sonore de audiofrecvenţă la un nivel de

intensitate dat). Teoria circuitelor, pornind de la legile lui Ohm şi Kirchhoff, utilizînd calculul operaţional, ecuaţiile diferenţiale etc., a reuşit să facă faţă acestor deziderate şi — prin completitudinea aparatului matematic utilizat — a pus în evidenţă felul cum un semnal electric aplicat într-un anume punct al unui circuit declanşează o serie de modificări de tensiune şi intensitate a curenţilor în întregul circuit, determinînd natura şi amploarea acestor modificări.

S-a ajuns, deci, la definirea circuitelor electrice ca sisteme în care parametrii (rezistenţe, capacităţi, inductanţe, coeficienţi de amplificare), tensiunile şi curenţii constituie obiecte aflate în interacţiune şi al căror ansamblu — adică circuitul — reacţionează într-un mod univoc şi previzibil la un semnal dat. Este de reţinut că la definiţia sistemului: „colecţie de obiecte aflate în interacţiune", s-a adăugat caracteristica: „şi care se comportă în mod specific şi previzibil în raport cu o modificare în mediul său înconjurător (adică un stimul, semnal, etc.)".

3. *Economia politică* premarxistă, urmată de cadrul conceptual concret şi complet pe care l-a dat economia politică marxistă, contribuţiile de valoare ale econometriei (născută din matematizarea legilor, fenomenelor şi sistemelor economice), formează un al treilea pilon pe care este edificată teoria sistemelor. Este meritul ştiinţelor economice şi mai ales al magistralei analize economice înfăptuite de Karl Marx, de a fi evidenţiat activităţile economice ca rezultate ale interacţiunii complexe dintre forţa de muncă, uneltele de producţie, materiile prime, valoarea mărfurilor, preţuri, etc. în condiţii date — şi istoric determinate — de proprietate asupra mijloacelor de producţie şi de repartiţie a rezultatelor muncii. Aici a fost adusă o nouă contribuţie fundamentală la

definiția sistemului: faptul că numai expresia cantitativă a obiectelor care constituie un sistem și a relațiilor dintre obiecte nu este suficientă pentru cunoașterea comportamentului sistemului, ci este nevoie și de cunoașterea *nivelului de dezvoltare* al obiectelor din sistem. Astfel, modificarea nivelului de dezvoltare a forțelor de producție, privită ca amplificare a forței de muncă și a productivității acesteia nu duce numai la creșterea rezultatelor muncii ci și la un decalaj între forțele de producție și relațiile de producție ceea ce antrenează modificarea discontinuă, în salt, a relațiilor de producție situînd sistemul într-un „regim de funcționare" — aici mod de producție — avînd caracteristici cu totul noi.

1.2. Dialectica apariției teoriei sistemelor

Teoria sistemelor, dezvoltată pe fondul unei acumulări de fapte și teorii științifice, nu-și poate delimita obiectul cu precizia cu care fac acest lucru alte științe. Din moment ce existența a cel puțin două elemente interdependente (adică a unui *sistem*, asupra definiției căruia vom mai reveni) poate fi identificată în cadrul celor mai diferite domenii — natură, tehnică, economie, societate — abordate de științe diferite și cu metode diferite, este natural să ne întrebăm asupra legitimității teoriei sistemelor. Oare nu cumva această știință este un „rege fără țară"? Aici ne poate furniza un răspuns constatarea că marea complexitate a realității înconjurătoare nu se datorește numai mulțimii și diversității obiectelor care-o alcătuiesc ci, mai ales, legăturilor dintre aceste obiecte. Făcînd această constatare ne apropiem de adevăr: teoria sistemelor nu studiază obiectele fizice

așa cum o face fizica, obiectele economice așa cum o fac științele economice ș.a.m.d. deci nu încearcă să se substituie acestora. Ceea ce constituie obiectul științei sistemelor este modul general de interacțiune al unor obiecte aparținînd unor clase diferite, fără a lua în considerare specificul acestor clase. Ceea ce este specific teoriei sistemelor este faptul că adevărurile pe care le enunță sînt, din punct de vedere logic și conceptual, independente de proveniența lor din alte ramuri ale științei, idee subliniată încă din 1949 de W. Ross-Ashby unul din promotorii ciberneticii[2]. De exemplu, conceptul de stabilitate a sistemelor se aplică în aceiași termeni unui sistem fizic, tehnologic, economic sau de altă natură, ceea ce demonstrează faptul că stabilitatea sistemelor este independentă de natura lor. Pe de altă parte, se poate constata că stabilitatea, ca proprietate a unui sistem, nu constituie o noțiune centrală în alte științe. Ea este deci o proprietate generală care se poate defini și analiza prin generalizarea unor proprietăți observate local. Acest exemplu rămîne valabil pentru întreaga teorie a sistemelor, care reprezintă produsul unei generalizări a rezultatelor obținute în alte științe. Evidențiind ceea ce este comun tuturor sistemelor, descriind într-un limbaj unitar structura și comportamentul lor, cu aportul matematicii (instrument de lucru cu universalitate recunoscută), teoria sistemelor răspunde unei necesități obiective. Este vorba de necesitatea abordărilor interdisciplinare. Nu de puține ori, cercetări fructuoase în domeniul fiziologiei s-au oprit la frontiera cu chimia tocmai pentru că lipsea un limbaj și o metodă unitară de studiu. Nu sînt rare momentele cînd, în de-

[2] W. ROSS-ASHBY, *Introducere în cibernetică*, Editura Tehnică, București, 1973, p. 12.

cursul istoriei, ştiinţele economice ar fi putut împrumuta mai mult din experienţa fizicii sau biologiei, întrebuinţînd instrumente comune de cercetare şi formulîndu-şi problemele în aceiaşi termeni. Exemple de acest tip, care se pot înmulţi cu uşurinţă demonstrează necesitatea — istorică, am putea spune! — a saltului de la abordări locale, „artizanale" la abordări generale, „industriale" a problemelor puse în faţa ştiinţei. Fără pretenţia de a fi o ştiinţă a ştiinţelor, un limbaj universal şi complet, o sinteză totală, teoria sistemelor a răspuns într-o măsură semnificativă necesităţii menţionate. Efectuarea saltului către studiul sistemelor, independent de natura lor, a fost permisă tocmai prin acumulările realizate în ştiinţe care studiau (şi studiază) anumite clase de obiecte şi sisteme (fizice, tehnice, biologice, economice, sociale etc.). Procesul de generalizare şi abstractizare care a condus la definirea conceptelor fundamentale ale teoriei sistemelor a modificat, în acelaşi timp, o serie de reprezentări tradiţionale. Fără îndoială că noţiunea de „sistem" a preexistat teoriei sistemelor. Dar biologul îşi reprezenta această noţiune printr-un sistem circulator sau digestiv, inginerul avea reprezentarea unei reţele de producători şi consumatori de energie, iar fizicianul îşi imagina — de exemplu — un dispozitiv didactic cu pîrghie şi scripeţi.

„Stabilitatea" putea fi concepută de către constructor drept rezistenţa unei clădiri la şocuri, economistul şi-o putea defini ca pe o relativă egalitate între cerere şi ofertă care menţine echilibrul preţurilor, iar pentru navigator ea însemna calitatea unei nave de a nu fi deviată de la direcţia ei de către vînt sau valuri. Teoria sistemelor a demonstrat că noţiuni ca „sistem", „stabilitate" şi multe altele pot fi definite independent de obiectul lor fără a-şi

pierde din conţinut; astfel, reprezentări locale „specializate" au cedat în faţa unor reprezentări de nivel abstract dar cu o mare putere de cuprindere şi generalizare. Este drept că definiţiile şi reprezentările abstracte pot îngloba obiecte şi fenomene logic posibile dar inexistente în realitate. Nu trebuie să vedem aici rezultatul unei generalizări exagerate. În acest sens este notabil exemplul fizicii care operează în mod curent cu obiecte pe care logica le validează dar realitatea le infirmă: gazul ideal, resortul fără masă ş.a. Putem spune că această dialectică a apariţiei şi dezvoltării teoriei sistemelor este reprezentativă pentru întreaga istorie contemporană a ştiinţei. Faptul că teoria sistemelor se dezvoltă impetuos odată cu afirmarea tot mai nemijlocită a ştiinţei ca forţă de producţie, îi situează apariţia sub semnul necesităţii, nu al întîmplării.

1.3. Teoria sistemelor ca moment al istoriei ştiinţei

Aşa cum am mai spus, nu putem identifica decît în mod formal o dată a constituirii teoriei sistemelor ca ramură a ştiinţei. Această dată poate fi legată de lucrările lui Ludwig von Bertalanffy[3] datînd de la jumătatea secolului nostru. Von Bertalanffy a elaborat metode de analiză sistemică în biologie, a observat faptul că ele sînt generalizabile şi a fost preocupat de crearea unei teorii generale a sistemelor într-o formulare matematică. Deşi rolul de iniţiator al lui Ludwig von Bertalanffy este substan-

[3] L. V. BERTALANFFY, *Outline of General Systems Theory* în *„British Journal for the Philosophy of Science"*, vol. 2, aug. 1950.

țial, nu-l putem identifica cu începutul teoriei sistemelor, deoarece, așa cum arată într-o expresie foarte sintetică profesorul Corneliu Penescu, „explozia din această ramură științifică face ca, în definitiv, totul să fie acceptat ca un început", punct de vedere la care autorii aderă fără rezerve. Privind din acest unghi istoria teoriei sistemelor, este corectă — deși generală — afirmația că începutul ei aparține ultimelor decenii.

Teoria sistemelor nu a evoluat decît în mică măsură în mod de-sine-stătător, majoritatea contribuțiilor la dezvoltarea ei fiind aduse prin transferul sau generalizarea rezultatelor obținute în alte ramuri ale științei. Din acest motiv istoricul dezvoltării teoriei sistemelor este mai puțin punctat cu nume și date esențiale, iar cele mai multe lucrări fundamentale în domeniu sînt fie sinteze, fie culegeri de studii de probleme și capitole specializate; abordările monografice sînt puține. Mult mai numeroase sînt contribuțiile care vizează capitole ale teoriei sistemelor și nu teoria sistemelor în ansamblu. Dealtfel, recunoscînd caracterul interdisciplinar al teoriei sistemelor și dezvoltarea ei explozivă, multe lucrări de primă importanță resping pretenția de a fi exhaustive. În egală măsură, dezvoltarea paralelă — în multe privințe — a teoriei sistemelor, ciberneticii, automaticii, datorită comunității de instrumente și metode de lucru, constituie motivul pentru care cu greu putem spune dacă o anumită lucrare aparține teoriei sistemelor sau unuia dintre celelalte domenii menționate. Mai mult, o serie de elaborări teoretice în cadrul științei sistemelor sînt umbrite de propriile lor aplicații, ceea ce — în mod subiectiv, desigur — duce la evaluări inexacte ale rolului și importanței acestor elaborări teoretice. Vom mai menționa și faptul că în prezent investigațiile științifice

avînd ca obiectiv dezvoltarea teoriei sistemelor sînt desfășurate pe un front atît de larg încît este dificil și riscant să ne pronunțăm asupra acestor direcții concrete de cercetare pe care viitorul le va reține ca fecunde și aplicabile.

Din aceste motive, o bună doză de artificial și subiectiv ar fi prezentă în încercarea de a alcătui un tablou istoric al dezvoltării științei sistemelor. Sîntem de părere că este încă prematură această încercare. Este însă posibilă, necesară — și în spiritul teoriei sistemelor — prezentarea acesteia în contextul interdependențelor dintre ea și alte ramuri ale științei, evidențierea rolului teoriei sistemelor în știința contemporană.

Nu vom ezita totuși ca, fără ambiția completitudinii, să amintim numele unor savanți cu contribuții majore la dezvoltarea teoriei sistemelor: W. Ross-Ashby, G. J. Klir, L. A. Zadeh, E. Polak, C. A. Desoer (teoria generală a sistemelor), J. A. Goguen, R. Kalman, M. Arbib, R. Falb (teoria matematică a sistemelor), R. E. Bellman, A. Feldbaum, L. Pontriaghin (tehnici de optimizare), A. N. Kolmogorov, Markov (sisteme stochastice, sisteme cu memorie), L. S. Lasdon (teoria sistemelor mari), M. Mesarovič (sisteme ierarhizate), J. W. Forrester (modelarea și simularea sistemelor).

În țara noastră, învățămîntul și cercetarea în domeniul teoriei sistemelor înregistrează aportul valoros și original a numeroși oameni de știință: Vasile Mihai Popov, Edmond Nicolau, Corneliu Penescu, Sergiu Călin, Constantin Belea, Vlad Ionescu, Nicolae Racoveanu ș.a. Este remarcabilă activitatea de pionierat consacrată introducerii teoriei sistemelor în domenii ca: istorie, teoria relațiilor internaționale — Mircea Maliță, știința conducerii societății —

Mihai Drăgănescu, cercetarea viitorului — Mihai Botez. În domeniul aplicării teoriei sistemelor și ciberneticii în economie, se poate vorbi despre o adevărată școală românească inițiată și condusă de academicianul Manea Mănescu. O serie de rezultate — unele dintre ele fiind de pionierat, mai ales în domeniul optimizării sistemelor deterministe și nedeterministe au fost obținute în țara noastră în cadrul laboratorului de Modele pentru sisteme informatice de la Institutul Central pentru Conducere și Informatică.

2. NOȚIUNILE FUNDAMENTALE ALE TEORIEI SISTEMELOR

2.1. Definiția sistemului

Formularea unei definiții a *sistemului* întîmpină o dificultate specifică atunci cînd este vorba de a defini noțiuni care fac parte din gîndirea curentă. O noțiune proprie numai unui anumit domeniu specializat se poate defini în termenii domeniului respectiv. În schimb o noțiune de mare generalitate creează întîi impresia că definirea ei este inutilă, din moment ce este utilizată fără a recurge la definiții. După ce o definiție este totuși elaborată, ea devine criticabilă, fie pentru că este prea largă (și inerent incompletă), fie pentru că este — dimpotrivă — prea restrictivă și nu acoperă în mod real obiectul de definit. De aceea nu vom alege o singură definiție, ci vom trece în revistă mai multe.

Astfel, o definiție simplă ar fi, după Edmond Nicolau și Al. Popovici[4]: „se identifică existența unui *sistem* ori de cîte ori se pune în evidență o relație între minimum două mărimi sau obiecte". Punînd în evidență aspectul de cauzalitate asociat noțiunii de sistem, Corneliu Penescu îl definește: „Se nu-

[4] EDMOND NICOLAU, AL. POPOVICI, *Inițiere în cibernetica sistemelor continue*, Ed. Tehnică, București, 1972, p. 11.

meşte sistem modelul, fizic realizabil, al dependenţei y de u dacă există o cauzalitate $u \to y$ şi nu există cauzalitatea $y \to u$"[5]. Această definiţie presupune însă cunoscut aprioric mecanismul cauzal. De aceea se propune încă o definiţie: „Se numeşte sistem modelul fizic realizabil al unei structuri de elemente (fizice) a căror funcţionalitate poate fi caracterizată prin legi (fizice) deja evidenţiate"[6]. De data aceasta, definiţia propusă presupune aprioric cunoscută structura sistemului, ceea ce nu este întotdeauna posibil. Pentru a „concilia" cunoaşterea structurii cu cea a cauzalităţii, autorul citat dă ca definiţie finală: „Se numeşte sistem modelul fizic realizabil al dependenţei y de u dacă se cunoaşte parţial structura S însă suficient pentru a demonstra cauzalitatea"[7]. Jacques Popper defineşte sistemul insistînd asupra finalităţii acestuia văzut ca o cauzalitate dirijată: „Un sistem este o mulţime de elemente distincte grupate între ele, cu o anumită finalitate"[8], observînd, în consens cu definiţiile anterioare, că:

— oricît de mare ar fi complexitatea organizării elementelor sistemului, există o structură care defineşte explicit interacţiunile existente;
— deoarece oricărui sistem îi este proprie o anumită finalitate, interacţiunile între elementele sale sînt concepute în funcţie de aceasta.

Nu putem considera că am trecut în revistă principalele modalităţi de definire a sistemului înainte de a examina încă o definiţie importantă, aceea legată de conceptul de *stare a sistemului*. Pentru aceasta trebuie să explicăm noţiunea de obiect abstract.

Dacă vom considera un obiect fizic — de exemplu un automobil — putem să-i identificăm o serie de atribute: greutatea (care variază în timpul mersului prin consumarea benzinei), direcţia de deplasare, viteza etc. Toate aceste atribute sînt măsurabile şi pot fi explicitate prin funcţii de timp $x_1(t), x_2(t), \ldots x_n(t)$. De asemenea se poate evidenţia dependenţa între aceste funcţii, ca de exemplu dependenţa consumului de benzină (deci a greutăţii) de viteza automobilului. Reţinînd numai relaţiile matematice obţinute şi renunţînd la semnificaţia lor fizică, am redus obiectul fizic luat ca exemplu la un *obiect abstract*. După expresia lui W. Ross-Ashby, „sistemul nu mai înseamnă acum un obiect, ci o listă de variabile"[9].

Vom observa, în continuare, că cel puţin o parte din atributele unui sistem depind de o serie de acţiuni exercitate asupra lui. Astfel, în exemplul ales, variaţia direcţiei de deplasare depinde de rotirea cu un anumit unghi a volanului iar viteza depinde de forţa cu care este apăsată pedala de acceleraţie. Vom numi aceste acţiuni exercitate asupra sistemului *intrări*, iar atributele modificate din cauza acestor acţiuni, *ieşiri*. Prin măsurare se pot obţine o mulţime de *perechi intrare-ieşire*, adică pentru o rotaţie cu α_1 grade a volanului are loc un viraj de β_1 grade, pentru o rotaţie a volanului cu α_2 grade, virajul este de β_2 grade, ş.a.m.d. Este evident că pentru sistemul considerat putem identifica multe perechi de acest tip: rotaţia volanului — unghi de viraj, forţa de apăsare a pedalei — viteză etc. Descrierea unui sistem ca

[5] CORNELIU PENESCU, *Sisteme*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1975, p. 35.
[6] C. PENESCU, *op. cit.*, p. 36.
[7] C. PENESCU, *op. cit.*, p. 36.
[8] J. POPPER, *La dinamique des systèmes*, Les Editions d'Organisation, Paris, 1973.
[9] W. ROSS-ASHBY, *Introducere în cibernetică*, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1973.

mulțime de perechi intrare-ieșire se poate, însă, vădi insuficientă, lucru ușor de observat dacă ne gîndim la faptul că o aceeași forță de apăsare a pedalei de accelerație produce viteze diferite după cum cutia de viteze este cuplată într-o poziție sau alta. Deci, anumite ieșiri nu depind direct de intrările respective, ci prin intermediul unor alte mărimi, cum ar fi, în cazul nostru, poziția schimbătorului de viteze și raportul de transmisie corespunzător, obținut în interiorul cutiei de viteze. Raportul de transmisie are deci caracterul unei mărimi care condiționează în mod univoc o anumită pereche intrare-ieșire. Vom numi aceste mărimi *stări* ale sistemului. *Stările* sistemului sînt funcții de intrări, deoarece raportul de transmisie din cutia de viteze, ca stare, este rezultatul unei acțiuni asupra schimbătorului de viteze, ca intrare.

Deci *ieșirile* pot fi funcție directă de *intrare* (ca în cazul schimbării direcției) sau atît de *intrare* cît și de *stare* care, și ea, depinde de *intrare*. Vom ilustra acest lucru în tabelul 1.

Tabelul 1

Ieșiri (y)	*Mărimi de care depinde ieșirea*	
	Intrări (u)	*Stări* (x)
Viteza	forța de apăsare a pedalei de accelerație	—
	poziția schimbătorului de viteze	raport de transmisie în cutia de viteze
Unghiul de viraj	unghiul de rotație a volanului	—

Așa cum s-a arătat la definirea obiectului abstract, atributele sistemului (stări sau/și ieșiri) precum și acțiunile întreprinse asupra sa (intrări) pot fi exprimate matematic prin niște funcții de timp, iar dependența ieșirilor de stări sau/și intrări se poate formula în același mod. Condensat, notînd cu y ieșirile, cu x stările și cu u intrările, se poate scrie:

$$y = f(x,\ u). \tag{2.1.1.}$$

Aici putem face două observații:

— unui anumit moment de timp nu-i pot corespunde decît valori unice ale intrărilor, stărilor și ieșirilor, deoarece ipoteza că oricare dintre ele ar putea avea simultan două sau mai multe valori diferite este absurdă;

— necesitatea, conformă definiției sistemului, de a cunoaște structura sa, S, cel puțin în măsura necesară identificării cauzalității specifice care-l guvernează, impune și cunoașterea dependenței stărilor x de intrările u, adică:

$$x = \varphi(u). \tag{2.1.2.}$$

Însă, fie că asupra sistemului se exercită anumite acțiuni sau nu, el se află într-o anumită stare. Deci pentru a cunoaște în mod real dependența stărilor succesive ale sistemului în funcție de o succesiune temporală de comenzi, este necesar să cunoaștem și starea inițială, „punctul de plecare" al sistemului la momentul t_0, ceea ce face ca, în realitate, funcția φ să fie exprimată astfel:

$$x(t) = \varphi[x(t_0),\ u(t)] \tag{2.1.3.}$$

ceea ce aduce relația intrare-stare-ieșire la forma completă:

$$y(t) = f[x(t_0),\ u(t)]. \tag{2.1.4.}$$

O astfel de reprezentare a unui obiect fizic printr-o relaţie intrare-stare-ieşire care îi caracterizează structura şi îi evidenţiază mecanismele cauzale în virtutea cărora funcţionează, eludează — fără a

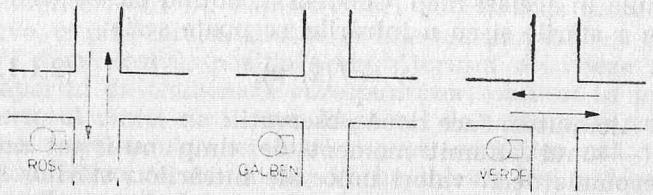


Fig. 2.

pierde informaţii relevante — identitatea fizică a obiectului respectiv. Obiecte fizice puternic individualizate prin atributele lor concrete îşi găsesc în acest fel un mod comun de reprezentare. *În acest fel, noţiunea de sistem capătă o dublă determinare, incluzînd atît un anume obiect fizic cît şi reprezentarea structurii şi cauzalităţii sale printr-o relaţie intrare-stare-ieşire.*

Vom mai remarca faptul că există sisteme a căror cauzalitate poate fi înţeleasă şi cunoscută printr-o relaţie intrare-stare-ieşire ale cărei variabile u, x şi y nu sînt funcţii de timp. De exemplu, un semafor electric poate avea trei stări: culoarea roşu, galben sau verde. Ieşirile sistemului sînt: circulaţie nord-sud pentru culoarea roşu, nici o circulaţie pentru culoarea galben şi circulaţie est-vest pentru culoarea verde. Intrările vor fi evident, cele trei poziţii ale comutatorului normal al semaforului (fig. 2.).

Din această descriere a sistemului luat ca exemplu reiese faptul că relaţia intrare-stare-ieşire este

perfect determinată fără ca vreuna dintre variabilele acestei relaţii să fie exprimată ca funcţie de timp. Astfel de sisteme în care timpul nu intervine ca variabilă independentă esenţială se numesc *sisteme statice* (sau *staţionare*).

Prin opoziţie, sistemele la care timpul constituie o variabilă independentă esenţială — adică intervine în expresia intrărilor, stărilor şi ieşirilor — se numesc *sisteme dinamice*. Principalele rezultate obţinute atît în cadrul teoriei sistemelor cît şi în aplicaţiile ei, vizează în special sistemele dinamice, întrucît aspectul temporal al funcţionării unui sistem este de o importanţă majoră în cele mai multe abordări sistemice. Ipoteza simultaneităţii între cauză (intrare) şi efect (stări şi ieşiri) nu poate fi admisă decît pentru clase foarte restrînse de obiecte sau procese.

Un alt concept deosebit de fecund pentru teoria sistemelor este cel de *sistem optimal*. Înainte de a-l defini, este important să ne reamintim că teoria sistemelor a apărut nu numai din necesitatea de a explica în mod unitar comportamentul şi interacţiunile unor obiecte fizice sau abstracte, ci şi din perspectiva utilizării conştiente, în scopuri determinate a comportamentului unor sisteme. Sistemele al căror comportament satisface maximal o anumită cerinţă impusă funcţionării lor se numesc *sisteme optimale*. Este mai puţin evident şi, de aceea, trebuie subliniat faptul că a fi optimal nu este o proprietate generală a unui astfel de sistem ci un sistem este optimal numai în raport cu un anumit criteriu. Dacă acest criteriu este minimizarea energiei potenţiale a unui corp, orice corp în cădere liberă care se opreşte în poziţia de energie potenţială minimă este un sistem optimal conform criteriului enunţat.

Încă o precizare este absolut necesară: noțiunea de sistem include atît un anume obiect fizic cît și reprezentarea sa sub forma unei relații intrare-stare-ieșire. În cazul primului exemplu, automobilul este obiectul fizic iar reprezentarea sa este cea dată în tabelul avînd forma generală a ecuației (2.1.4.). Dar, în afara atributelor menționate ca stări și ieșiri, automobilul poate fi caracterizat și prin: culoare, poziție în spațiu, formă, temperatură etc. Din nou îl vom cita, pe W. Ross-Ashby: „... fiecare obiect material conține nu mai puțin decît o infinitate de variabile și deci de sisteme posibile"[10]. Reținem de aici faptul că *orice reprezentare sistemică a unui obiect fizic este mai mult sau mai puțin incompletă, dar acest lucru se explică prin faptul că dezideratul completitudinii nu stă sub semnul necesității.* Pentru a studia cinematica automobilului nu este nevoie să-i cunoaștem temperatura sau culoarea. Deci o reprezentare a sa orientată către studiul cinematicii va reține numai variabilele relevante din acest punct de vedere. *Completitudinea reprezentării nu trebuie cerută în raport cu totalitatea atributelor obiectului, ci în raport cu obiectivul reprezentării.*

Fără a insista, pentru moment, asupra structurii ierarhice a unor sisteme, urmează, în ordine naturală, introducerea noțiunii de *subsistem.* Să admitem că automobilul remorchează o rulotă. În acest caz greutatea rulotei se adaugă la greutatea automobilului și se va observa imediat că pentru o aceeași forță de apăsare pe pedala accelerației, viteza obținută este mai mică decît în cazul automobilului singur. Dacă vom considera forța de apăsare pe pedală și viteza ca pereche intrare-ieșire vom obține altă mulțime de perechi distincte intrare-

[10] W. ROSS-ASHBY, *op. cit.*, p. 14.

ieșire ceea ce ne pune în prezența altui sistem: sistemul automobil-rulotă. Antrenarea rulotei de către automobil este în mod cert o interacțiune, iar pe de altă parte, viteza constituie o ieșire comună a sistemului-automobil și a sistemului-rulotă. În acest caz vom spune că sistemul este format din două *subsisteme:* automobilul și rulota.

O ultimă precizare asupra definiției sistemului se referă la absența noțiunii de obiect fizic din definiția sistemului. Acest lucru nu este întîmplător, deoarece nu este necesar ca un sistem să aibă un suport fizic. De exemplu, în matematică, logică, lingvistică, sistemele nu se asociază cu obiecte fizice. În schimb, definiția sistemului ca *obiect fizic realizabil* impune ca legătura cauzală dintre intrare și ieșire să fie neanticipativă, adică efectul să fie precedat de cauză. Această condiție determină existența oricărui obiect fizic. Asupra realizabilității fizice a sistemului se va mai reveni în această lucrare.

Studiul sistemelor biologice, fizice sau tehnice a făcut posibilă analogia cu numeroase structuri și procese din cîmpul științelor economice și sociale. De foarte multe ori însă, sistemele economice sau sociale sînt de o complexitate care pune în dificultate arsenalul clasic de tehnici și metode al teoriei sistemelor. „Uneori noțiunea de sistem a fost redusă la sisteme tehnice, fizice, biologice. Într-un asemenea cadru s-a dezvoltat teoria sistemelor astfel cum este cunoscută astăzi și în care sistemul este definit prin noțiuni abstracte matematice"[11]. Din acest motiv, atitudinea reducționistă, de a privi sisteme noi, calitativ deosebite, de dimensiuni mari,

[11] M. DRĂGĂNESCU, *Sistem și civilizație*, Ed. Politică, București, 1976, p. 175—176.

prin prisma conceptelor și metodelor elaborate pentru numai o parte din universul sistemelor, ar constitui o frînă puternică în dezvoltarea teoriei sistemelor. „O teorie a unor asemenea sisteme, care să presupună o încadrare matematică completă, după cum s-a reușit în parte pentru teoria sistemelor tehnice, nu există"[12]. De aceea, edificiul conceptual și metodologic actual al teoriei sistemelor nu trebuie privit ca definitiv și complet.

2.2. Sisteme deschise și închise

Faptul că majoritatea definițiilor noțiunii de sistem fac legătura dintre structura sistemului și mecanismul său cauzal induce necesitatea de a se adînci studiul acestei legături. Experiența acumulată de analiza sistemelor arată, încă înainte de a face apel la un suport teoretic, că există două moduri fundamentale de dependență a ieșirii de intrare:

a) ieșirea este determinată de intrare, direct sau prin intermediul stării (fig. 3, *a*);

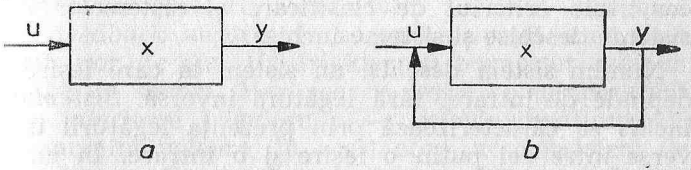
b) ieșirea depinde de intrare dar o și modifică într-o anumită măsură (fig. 3, *b*).

Primul caz poate fi exemplificat cu ușurință printr-un angrenaj de roți dințate în care *ieșirea* — viteza unghiulară de rotație a ultimei roți — este proporțională cu *intrarea* — viteza unghiulară a primei roți — și nu o influențează în nici un fel.

În cazul al doilea ne putem imagina comportarea unei specii zoologice — fie aceasta o specie de rozătoare — în două situații:

[12] *Idem*, p. 177.

b_1) numărul de exemplare din specia respectivă nu este limitat nici de existența unei specii de răpitoare și nici de cantitatea de hrană disponibilă. Matematic se poate demonstra că ieșirea (numărul total de exemplare) crește nedefinit (dacă numărul de



a *b*

Fig. 3.

nou-născuți este mai mare decît numărul decedaților), scade chiar la zero (dacă se inversează inegalitatea) sau rămîne constant (dacă există egalitate);

b_2) vom presupune că specia de rozătoare considerată constituie hrana unei specii de răpitoare. Vom nota cu r_n ritmul de creștere a populației de rozătoare prin nașterea unor noi exemplare (ritmurile se exprimă în procente față de totalul populației), r_m ritmul de scădere (datorită morții exemplarelor bătrîne); r_s ritmul de scădere suplimentar (datorită existenței răpitoarelor). Creșterea speciei de rozătoare este încetinită dacă $r_n - r_m - r_s > 0$, limitată dacă $r_n - r_m - r_s = 0$ sau, dacă $r_n - r_m - r_s < 0$ specia de rozătoare dispare. Dacă specia de răpitoare crește, r_s crește și deci se reduce specia de rozătoare. Aceasta implică apariția deficitului de hrană care începe să limiteze sau chiar să reducă specia de răpitoare. Va scădea r_s și prin urmare începe să crească specia de rozătoare.

Aceste oscilații pot avea ca rezultat fie dispariția speciei de rozătoare urmată inevitabil de dispariția

speciei de răpitoare, fie dispariţia acesteia urmată de evoluţia liberă a speciei de rozătoare fie, în sfîrşit, stabilirea unui raport constant între specii.

Exemplele analizate pun în evidenţă posibilitatea *legăturii inverse* — de la ieşire către intrare — care constituie criteriul de clasificare al sistemelor în sisteme deschise şi sisteme închise.

Numim *sistem deschis*, un sistem la care ieşirea depinde de intrare, fără legătură inversă. *Sistemul închis* se caracterizează prin prezenţa legăturii inverse între cel puţin o ieşire şi o intrare. În majoritatea lucrărilor, legătura inversă este găsită sub numele de *feedback*. Se mai foloseşte în aplicaţii tehnice, mai cu seamă în electronică, pentru a desemna legătura inversă cuvîntul *reacţie*. Pentru generalitate terminologică şi lingvistică vom folosi în cele ce urmează denumirea de feedback. În aceeaşi ordine de idei, termenul „a controla" nu mai are, în teoria sistemelor, înţelesul de „a verifica" ci înţelesul mai larg de „a conduce", adică a acţiona asupra intrării. În acest fel se poate spune că la sistemele închise avem de-a face cu un control al ieşirii asupra intrării. De cele mai multe ori într-un sistem închis putem identifica trei subsisteme: un subsistem *condus* (a cărui ieşire controlează intrarea întregului sistem), un subsistem *de conducere* sau *decizional* (a cărui ieşire constituie intrarea subsistemului condus) şi un subsistem *de reacţie* (care transmite ieşirea subsistemului condus la intrarea subsistemului decizional). Structura generală a unui astfel de sistem închis este reprezentată în fig. 4.

Mărimea (sau mărimile) care constituie simultan ieşiri din subsistemul decizional şi intrări în sistemul condus constituie *decizia* şi au rolul de a controla sistemul condus.

2.3. Feedback negativ şi pozitiv

Modul în care acţionează decizia formează un criteriu de analiză a feedback-ului.

Dacă decizia urmăreşte aducerea ieşirii la un anumit nivel (valoare, intensitate) sistemul utilizează un *feedback negativ*. În această privinţă exemplele sînt uşor de dat. Un frigider cu termostat este un astfel de sistem. Mărimea de ieşire — temperatura din interiorul frigiderului — trebuie menţinută la o anumită valoare. În acest scop, un subsistem de reacţie — fie acesta un termometru — măsoară temperatura şi o transmite, sub o formă sau alta, subsistemului decizional care are la dispoziţie trei posibilităţi de decizie:

— pornirea motorului frigiderului,
— oprirea motorului,
— lăsarea motorului în starea în care este: pornit sau oprit.

Fie intrarea independentă o temperatură T_0 care trebuie menţinută. Putem reprezenta funcţionarea frigiderului ca în tabelul 2, notînd cu T mărimea de

Tabelul 2

Stare (*motor*)	*Ieşire* (*temperatura*)	*Decizie* (*pornirea sau oprirea motorului*)
motor pornit	$T > T_0$	motorul rămîne pornit
	$T = T_0$	motorul se opreşte
	$T < T_0$	motorul opreşte
motor oprit	$T > T_0$	motorul porneşte
	$T = T_0$	motorul porneşte
	$T < T_0$	motorul rămîne oprit

ieşire. Spre deosebire de sistemele cu feedback negativ, cele cu feedback pozitiv nu sînt orientate către aducerea şi menţinerea ieşirii la un anumit nivel. Ca exemplu vom menţiona cazul deja citat al

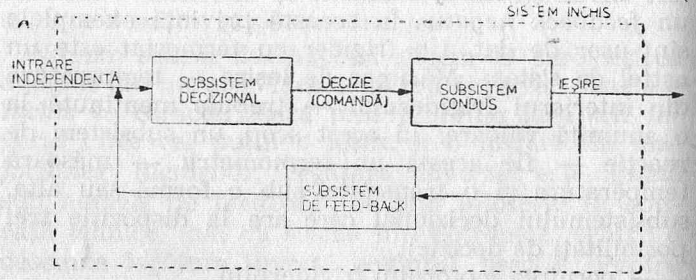


Fig. 4.

speciei de rozătoare cu număr de exemplare nelimitat de hrană sau de existenţa unei specii de răpitoare.

Structura sistemului închis (fig. 4) mai este numită şi buclă de feedback (pozitiv sau negativ). Numeroase sisteme închise se compun însă dintr-o pluralitate de bucle de feedback care interacţionează. Este cazul coexistenţei celor două specii de rozătoare şi răpitoare din exemplul dat mai înainte. Fiecare specie în parte constituie o buclă de feedback pozitiv, dar vînarea rozătoarelor de către răpitoare are loc în cadrul unei bucle de feedback negativ care limitează creşterea populaţiei de rozătoare, limitînd şi hrana disponibilă — deci creşterea populaţiei de răpitoare. Interacţiunea acestor bucle de feedback conduce la următoarele rezultate posibile:

— cele două specii coexistă şi populaţia lor creşte nelimitat; în acest caz, feedback-urile pozitive sînt „mai puternice" decît cele negative;

— cele două specii coexistă dar populaţia lor se menţine constantă la un nivel de echilibru; în acest caz predomină feedback-ul negativ care urmăreşte realizarea şi menţinerea unor ieşiri constante;

— cele două specii coexistă şi scad (pînă la dispariţie); şi în acest caz feedback-ul negativ este predominant şi urmăreşte scăderea (anularea) ieşirii.

Fără a fi necesară în cazul nostru o fundamentare matematică riguroasă se poate spune că situaţiile de „conflict" între feedback-uri negative şi pozitive conduc, atunci cînd timpul tinde la ∞, la rezultate tipice pentru unul din cele două tipuri de feedback: creştere sau scădere limitată la o valoare constantă şi finită (feedback negativ) sau creştere nelimitată decît de factori externi sistemului (feedback pozitiv).

2.4. Sisteme continue, discrete şi hibride[13]

Din punct de vedere al modului în care se petrece variaţia în timp a mărimilor de stare şi de ieşire a unui sistem putem distinge:

— *sisteme continue.* După cum arată şi numele în aceste sisteme modificarea mărimilor de stare şi ieşire se face în mod continuu, aşa cum se petrec

[13] O bună introducere, cu caracter monografic, în acest domeniu o constituie lucrările lui EDMOND NICOLAU şi AL. POPOVICI: *Introducere în cibernetica sistemelor discrete, Introducere în cibernetica sistemelor continue, Introducere în cibernetica sistemelor hibride*, apărute în Ed. Tehnică, Bucureşti, 1966 (resp. 1972 şi 1975).

lucrurile, de exemplu, într-un sistem de vase comunicante în care presiunea lichidului, înălțimea lui în fiecare vas, etc. nu pot înregistra salturi ci numai variații continue (chiar dacă sînt foarte rapide);

— *sisteme discrete*. Acestea sînt sisteme în care mărimile de stare și ieșire variază în salt. Astfel la oricare din speciile biologice care au constituit obiectul exemplelor anterioare, mărimile de stare și ieșire care reprezintă populația speciilor respective nu pot fi decît numere întregi ceea ce ilustrează faptul că variația lor are loc în salt;

— *sisteme hibride*. În structura acestor sisteme sînt prezente simultan mărimi de stare și ieșire cu variație atît continuă cît și discretă. Viteza unui automobil este o mărime de ieșire continuă, dar în cadrul variației ei, au loc modificări discrete ale poziției schimbătorului de viteze (ca stare).

Descrierea matematică a sistemelor prin relații de intrare — stare — ieșire, precum și metodele de identificare a acestor relații nu pot să ignore natura continuă, discretă sau hibridă a unui anumit sistem. Din aceste motive pentru unitatea tratării matematice a unui sistem se recurge la discretizare — aproximarea unui sistem continuu printr-un discret — sau la procedeul invers, continuizarea. În ambele cazuri, dacă sistemul este dinamic, el poate fi tratat continuu sau discret prin adoptarea unei scări continue, respectiv discrete pentru variabila independentă esențială: timpul. Un sistem continuu va fi reprezentat prin relații în care variabila t poate lua orice valoare, iar un sistem discret se poate descrie prin relații în care variabila t variază cu cîte o unitate neputînd lua valori intermediare în intervalul $(t, t + 1)$.

2.5. **Proprietățile sistemelor**

Comportamentul de mare varietate al sistemelor fizic existente sau imaginabile nu poate fi redus la structura și cauzalitatea lor — necesare prin definiție a fi cunoscute — ci trebuie să fie descris și explicat prin evidențierea proprietăților generale ale sistemelor. Aceste proprietăți sînt de două feluri:

— proprietăți informaționale sau externe, care nu depind de structura sistemului și care se pot defini numai în concordanță logică cu definiția sistemului;

— proprietăți structurale sau interne, care sînt dictate de structura sistemului și care, respectîndu-i definiția, particularizează din punct de vedere structural anumite clase de sisteme.

2.5.1. *Proprietăți externe*

Netrivialitatea intrării și ieșirii. Această proprietate presupune că orice sistem trebuie să aibă cel puțin o funcție de intrare și că ieșirea nu trebuie să fie identică cu intrarea. Evidențierea acestei proprietăți poate să pară artificială sau redundantă și, de aceea, se cere explicată. Sistemul trebuie să fie caracterizat prin structură și legături cauzale. De aceea absența oricărei intrări u face imposibilă depistarea unei cauzalități $u \rightarrow y$. Pe de altă parte dacă ieșirea y ar fi identică cu intrarea u, ar fi complet eludat conceptul de stare, fără de care nu poate fi identificată structura sistemului. În ambele cazuri ar fi contrazisă definiția sistemului care presupune cunoașterea structurii cel puțin în măsura de care este nevoie pentru a demonstra cauzalitatea.

Concatenaritatea intrărilor este o proprietate care impune variabilei de intrare a unui sistem condiția următoare: dacă intrarea, ca funcție de timp, $u(t)$, este dată pe porțiuni:

$$u_1(t_0, t_1),\ u_2(t_1, t_2),\ u_3(t_2, t_3),\ \ldots\ u_n(t_{n-1}, t_n)$$

ea trebuie să admită și o formă generală:

$$u(t_0, t_n)$$

astfel ca:

$$u(t_i, t_{i+1}) = u_{i+1}(t_i, t_{i+1})$$

pentru orice

$$i \leqslant n - 1.$$

2.5.2. *Proprietăți interne*

Accesibilitatea unui sistem este proprietatea acestuia de a accepta un număr de $p \geqslant 1$ intrări și $n \geqslant 1$ ieșiri. Revenind la un exemplu dat anterior, automobilul ca sistem (evident simplificat) este accesibil la trei intrări: forța de apăsare a pedalei de accelerație, poziția schimbătorului de viteze și unghiul de rotație a volanului și două ieșiri: viteza și direcția de mers. Dacă un sistem nu ar accepta nici o intrare sau/și nici o ieșire ar fi contrazisă proprietatea de netrivialitate.

Observabilitatea constituie proprietatea unui sistem de a permite deducerea cel puțin a unei stări x, dacă se dau u și y. Observabilitatea este o condiție de existență a sistemului, deoarece, dacă nu se

poate identifica cel puțin o variabilă de stare, nu poate fi cunoscută structura care realizează cauzalitatea dată $u \rightarrow y$.

Controlabilitatea unui sistem este, în sens larg, proprietatea acestuia de a realiza un răspuns — o variație a ieșirii — atunci cînd îi este aplicată o variație a intrării. Un sistem este *global controlabil* atunci cînd întreaga evoluție în timp a variabilei sale de stare, $x(t)$ poate fi cunoscută pornind de la starea inițială $x(t_0)$ și evoluția în timp a intrărilor $u(t)$. Controlabilitatea globală mai înseamnă și că orice componentă a variabilei de intrare u influențează toate componentele ieșirii y. Această definiție induce imediat ipoteza că există și sisteme *parțial controlabile*. Într-adevăr, aceste sisteme sînt controlabile în sens larg, dar nu mai au proprietatea că toate componentele $y_1, y_2, \ldots y_n$ ale ieșirii sînt dependente de oricare intrare u_i. Reamintindu-ne un exemplu anterior, automobilul este un sistem controlabil în sens larg, adică orice modificare a apăsării pe pedala de accelerație și orice rotire a volanului provoacă schimbări de viteză sau de direcție, dar nu este global controlabil deoarece accelerarea nu produce o schimbare de direcție. În schimb, sistemul ecologic al celor două specii este global controlabil deoarece variația oricăreia din intrări (natalitățile u_n și u'_n sau mortalitățile u_m și u'_m) determină schimbări ale populațiilor totale y_1 și y_2.

Controlabilitatea parțială implică și proprietatea de *sensibilitate* care se definește în sens larg prin faptul că o variație infinit mică a lui u determină o variație infinit mică a ieșirii y, fără a preciza însă dacă acest lucru este valabil pentru toate componentele lui u și y. Făcînd aceste precizări se pot defini,

analog cu controlabilitatea, noţiunile de sensibilitate globală şi parţială.

Proprietatea de *stabilitate* a sistemelor necesită o serie de explicaţii prealabile. Să considerăm un sistem oarecare şi un interval de timp cuprins între momentul iniţial t_0 şi momentul final t_f. Fie starea iniţială a sistemului $x(t_0) = x_0$ şi să considerăm că, pe intervalul $t_0 - t_f$, $u(t) = 0$. În acest caz starea sistemului nu se va modifica, astfel că:

$$x(t) = x_0,$$

dacă

$$t_0 \leqslant t \leqslant t_f.$$

Se spune despre acest sistem că este în echilibru staţionar.

Vom presupune acum că în momentul iniţial sistemul este adus brusc în starea $x_1 \neq x_0$. Dacă, pentru t_f oricît de mare, sistemul tinde să revină în starea sa iniţială x_0, îl vom numi „sistem stabil liber". Dacă sistemul tinde să revină într-o stare finală $x_f \neq x_0$, el este „limitat stabil liber". Un exemplu de sistem stabil liber este pendulul fizic care, scos din starea sa de echilibru, revine la această stare după un număr de oscilaţii de amplitudine din ce în ce mai mică. Un corp aşezat în echilibru pe marginea unei mese are energia potenţială $E = m \cdot g \cdot h$, unde m = masa corpului; g = acceleraţia gravitaţională şi h = înălţimea mesei. Dacă acest corp este împins, va atinge în cădere liberă solul avînd de data aceasta energia potenţială $E = 0$. Deci, scos din starea iniţială — variabila de stare fiind energia — corpul revine în altă stare de echilibru staţionar, constituind un sistem limitat stabil liber.

2.6. Spaţiul intrărilor, stărilor şi ieşirilor

Pînă acum nu s-au făcut nici un fel de ipoteze asupra laturii cantitative a mărimilor de intrare, de stare şi de ieşire a unui sistem, insistînd mai ales asupra rolului lor. Totuşi, realitatea impune, în mod evident cîteodată, efectuarea unor consideraţii asupra naturii şi mărimii variabilelor unui sistem. Astfel forţa de apăsare a pedalei de acceleraţie nu poate lua valori oricît de mari deoarece nu are sens să depăşească forţa la care se obţine viteza maximă a automobilului. Unghiul de rotaţie a volanului nu este nici el nelimitat. Schimbătorul de viteze are un număr limitat de poziţii, deci raportul de transmisie poate lua un număr limitat de valori. Viteza automobilului este cuprinsă între 0 şi o limită maximă, iar direcţia sa de deplasare, măsurată ca unghi faţă de o axă (de exemplu axa nord-sud) nu poate lua valori mai mari decît 360°. Vom reuni aceste observaţii în tabelul 3. Putem reprezenta grafic acest

Tabelul 3

Tipul de variabilă	*Semnificaţia*	*Limitele de variaţie*	*Modul de variaţie*
Intrări	unghi de rotaţie a volanului	$0° - \alpha°$	continuu
	forţa de apăsare pe pedală	$0 - F_{max}$kgf	continuu
	poziţia schimbătorului de viteze	I, II, III, IV	discret
Stări	raport de transmisie în cutia de viteze	r_1, r_2, r_3, r_4	discret
Ieşiri	viteză	$0 - V_{max}$km/h	continuu
	direcţie	$0 - 360°$	continuu

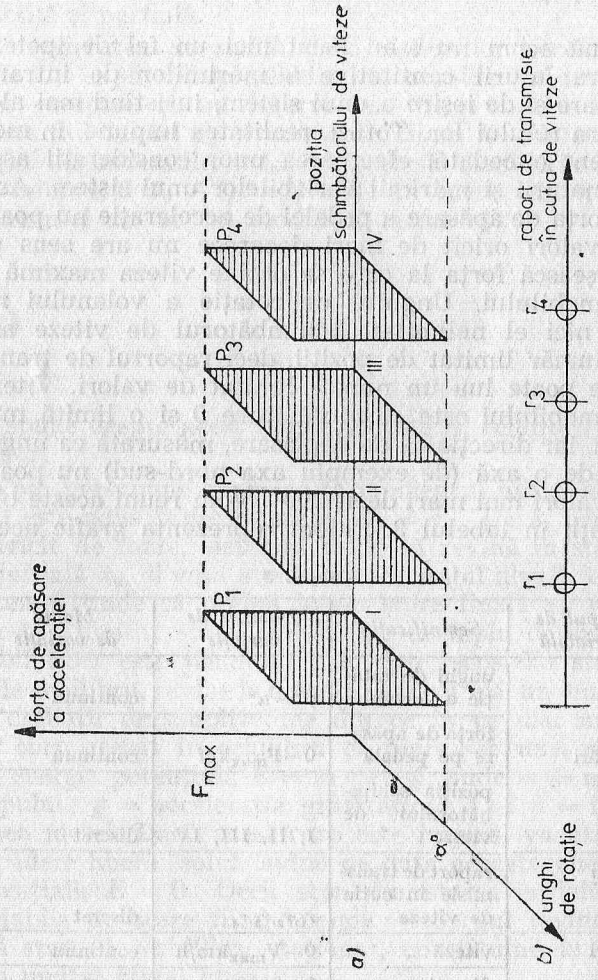


Fig. 5

tabel. Intrările, în număr de 3, se prezintă ca un spațiu cu 3 dimensiuni (fig. 5, *a*).

Orice tripletă de intrări va constitui un punct situat pe una din suprafețele P_1, P_2, P_3 sau P_4.

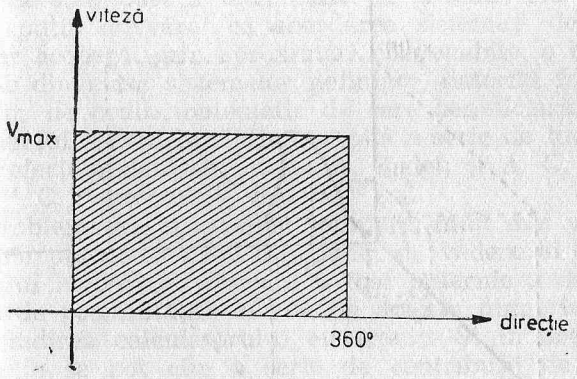


Fig. 6.

Variabila unică de stare se poate reprezenta prin patru puncte distincte pe o dreaptă (fig. 5, b).

Ieșirea, avînd două variabile, se reprezintă în plan (fig. 6).

În general, pentru un sistem cu m intrări, n stări și p ieșiri mulțimea intrărilor, respectiv stărilor și ieșirilor posibile se pot prezenta ca mulțimi de puncte într-un spațiu cu m, n sau p dimensiuni.

Aceste spații primesc numele de: spațiul intrărilor, spațiul stărilor și spațiul ieșirilor. În legătură cu spațiul stărilor se mai introduce și noțiunea de traiectorie. Această noțiune are sens pentru sistemele dinamice la care toate elementele se pot exprima ca funcții de timp. Traiectoria unui sistem este mulțimea, ordonată după timp, a stărilor prin care trece sistemul într-un interval de timp (t_0, t_f).

Reprezentarea grafică a traiectoriei pentru un sistem cu trei variabile de stare $x_1(t)$, $x_2(t)$ și $x_3(t)$ este dată în fig. 7 sub forma unei curbe în spațiu.

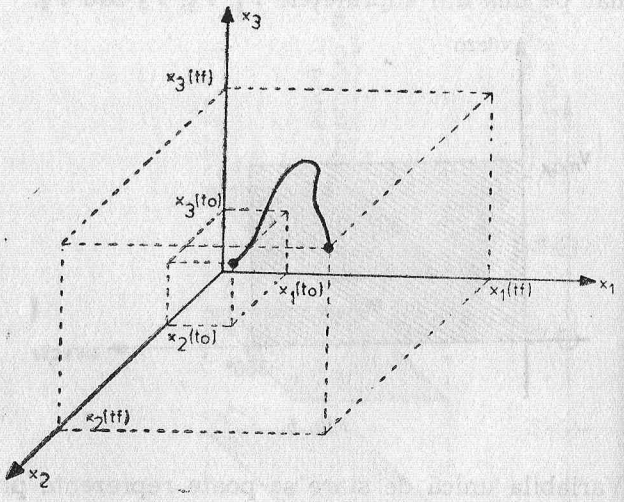


Fig. 7.

2.7. Sisteme liniare

Majoritatea rezultatelor obținute de teoria sistemelor provin din studiul sistemelor liniare; numeroase aplicații ale teoriei sistemelor se bazează pe conceptul de sistem liniar, iar în rezolvarea problemelor care implică sisteme neliniare este manifestă tendința de a aplica, pe cît posibil, metode de reducere a acestor sisteme la sisteme liniare.

Un sistem este liniar dacă ecuațiile sale de stare și de ieșire sînt liniare. În cazul sistemelor neliniare dependența ieșirii de intrare și stări este neliniară.

Extinderea rezultatelor teoretice și aplicațiilor în domeniul sistemelor liniare ne permit să vorbim astăzi despre teoria sistemelor liniare, nu atît ca un capitol al teoriei sistemelor, cît ca o teorie distinctă, de-sine-stătătoare a unei clase de sisteme. Nu este mai puțin adevărat că abordarea sistemică de tip liniar acoperă, prin aproximări convenabile, o bună parte din clasa sistemelor neliniare, datorită facilităților de ordin matematic de care beneficiază. În domeniul sistemelor liniare există o serie de lucrări de referință datorate lui L. A. Zadeh și A. C. Desoer[14], C. Penescu[15], V. Ionescu[16] ș.a.

Problematica sistemelor neliniare, mult mai vastă și mai puțin omogenă din punct de vedere al aparatului matematic propriu a fost puternic influențată de posibilitățile oferite de analiza numerică și răspîndirea calculatorului electronic. Și în această direcție se pot cita o serie de contribuții de valoare[17].

2.8. Sisteme ierarhizate

O trecere în revistă, oricît de sumară, a tipurilor de sisteme abordate în cadrul teoriei sistemelor nu poate ignora clasa sistemelor ierarhizate. Definirea

[14] L. A. ZADEH and C. A. DESOER, *Linear Systems Theory*, Mc Graw-Hill, New York, 1963.

[15] C. PENESCU, *Sisteme (concepte, caracterizări, sisteme liniare)*, Ed. Tehnică, București, 1975.

[16] V. IONESCU, *Sisteme liniare*, Ed. Academiei, București, 1973 și *Teoria structurală a sistemelor liniare*, Ed. Academiei, București, 1976.

[17] F. STĂNCIULESCU, *Analiza și simularea sistemelor neliniare*, Ed. Academiei, Buc. 1974 și E. I. BELTRAMI, *An Algorithmic Approach to Nonlinear Analysis and Optimization*, Academic Press, New York and London, 1970.

acesteia este intuitivă. Un sistem de distribuire a energiei electrice reprezintă un bun exemplu. El este constituit dintr-un grup de producători de energie (centrale electrice), un grup de consumatori (sec-

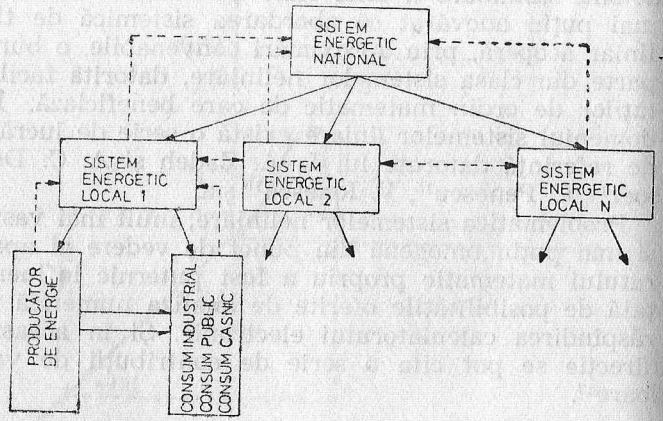


Fig. 8.

torul consumului industrial, sectorul consumului public, sectorul consumului casnic) şi un sistem de coordonare a producţiei şi consumului de energie electrică. Acest sistem are atribuţii multiple: echilibrează producţia şi consumul de energie, izolează consumatorii sau producătorii care ies din parametrii normali, acordă priorităţi în perioadele de consum de vîrf etc. Sistemul de coordonare, numit încă şi sistem reglator produce o serie de intrări pentru sistemele subordonate (sau reglate). Dat fiind că aceste intrări sînt aplicate cu scopul de a obţine anumite ieşiri, rezultă că sistemul reglat trebuie să fie observabil şi controlabil.

Acest sistem (fig. 8) are trei trăsături:

— este un *sistem de conducere,* avînd ca funcţie principală conducerea producţiei şi consumului de energie electrică conform unor criterii: economicitate, siguranţă în funcţionare etc.;

— este un *sistem ierarhizat* deoarece deciziile care se iau în interiorul lui (cărora le corespund intrări sau comenzi aplicate subsistemelor componente) apar ierarhic. Un sistem local de producere şi distribuţie a energiei electrice elaborează intrări (decizii) care afectează producătorii şi consumatorii pe care-i controlează, dar este condus, la rîndul său, prin deciziile produse de un sistem, de exemplu, naţional;

— este un *sistem închis,* pentru motivul că deciziile fiecărui sistem de distribuţie se iau pe baza unor informaţii despre starea sistemelor subordonate. În acest fel, sistemele reglate influenţează prin feedback sistemele regulatoare care la rîndul lor le conduc prin decizii (intrări).

În fig. 8 deciziile au fost reprezentate cu linii continue iar informaţiile care constituie legături inverse (închizînd bucla de reglare) apar cu linii punctate.

Teoria sistemelor ierarhizate a fost fundamentată de Mesarovič, Macko şi Takahara[18]. O contribuţie la aplicarea conceptelor acestei teorii pentru sisteme de conducere ierarhizate a fost realizată de F. Stănciulescu[19].

[18] M. D. MESAROVIČ, D. MACKO, Y. TAKAHARA, *Theory of Hierarchical Multilevel Systems,* Academic Press, New York, London, 1970.

[19] F. STĂNCIULESCU, *Concepte ale ştiinţei sistemelor aplicate la realizarea sistemelor de conducere ierarhizate* în vol. *Aplicaţii ale conceptelor actuale în ştiinţa sistemelor,* Ed. Academiei, Bucureşti, 1976.

2.9. Sisteme deterministe și nedeterministe, sisteme fuzzy

Despre sistemele analizate pînă acum nu au fost făcute nici un fel de afirmații privind posibilitatea de a cunoaște precis variabilele de stare și ieșire.

Imprecizia cunoașterii acestor variabile are o origine subiectivă, constituită de incompletitudinea cunoștințelor despre sistem și o origine obiectivă datorată impreciziei cu care funcționează sistemul. Nu ne vom referi la partea subiectivă a lucrurilor deoarece faptul că nu posedăm cunoștințe complete despre sistem nu afectează nici existența, nici funcționarea ca atare a sistemului.

Sistemele la care imprecizia este inerentă funcționalității lor sînt, în general abordate ca *sisteme probabiliste*.

Probabilitatea unui eveniment (o tranziție a sistemului din starea $x(t)$ în starea $x(t+1)$ presupune un număr mare de experimente asupra sistemului sau cunoașterea unei „istorii" îndelungate a acestuia, fiind în general exprimată ca o frecvență relativă, adică numărul de tranziții de tip $x(t) \to x(t+1)$ raportat la numărul total de tranziții.

O teoremă foarte importantă din teoria probabilităților, teorema lui Bayes, exprimă probabilitatea unei tranziții funcție de probabilitățile separate ale celor două stări și de probabilitatea apriorică a tranziției.

$$P[x(t) \to x(t+1)] = \frac{P_a[x(t) \to x(t+1)] \cdot P[x(t+1)]}{P[x(t)]}.$$

Să presupunem că într-un an sînt 200 zile cu cer acoperit și 165 zile cu cer senin. Probabilitatea apriori ca după o zi senină să urmeze o zi ploioasă este

$$P_a[x(t) \to x(t+1)] = 0{,}5$$

deoarece există numai două alternative. Probabilitatea unei zile senine (fără a ști cum a fost ziua precedentă) este:

$$P[x(t)] = \frac{165}{365},$$

iar probabilitatea unei zile ploioase este

$$P[x(t+1)] = \frac{200}{365}.$$

Deci probabilitatea ca după o zi senină să urmeze una ploioasă este:

$$P[x(t) \to x(t+1)] = \frac{0{,}5 \cdot 200}{165} = 0{,}606.$$

Această teoremă poate fi privită și ca expresia modificării unor opinii apriorice în lumina unor noi informații.

În mod analog se poate proceda pentru determinarea probabilităților ca o anumită comandă $u(t)$ să transfere sistemul din starea $x(t)$ în starea $x(t+1)$.

Un sistem în care relațiile intrare—stare—ieșire sînt caracterizate prin probabilități este un *sistem probabilist*. Imprecizia sau incertitudinea din descrierea sistemului se datoresc acestei caracteristici proprii sistemului.

În cadrul enumerării unor clase importante de sisteme o mențiune aparte se cuvine făcută sistemelor fuzzy, de o deosebită importanță prin noutatea lor și perspectivele pe care le deschid.

Este știut că un fenomen, proces sau sistem poate fi descris și analizat cu instrumentele matematicii, numai dacă cunoștințele despre el au un anumit nivel de precizie și completitudine. Natura, tehnica, economia sau societatea oferă însă multiple exemple de procese sau sisteme a căror cunoaștere nu atinge nivelul menționat fie din cauza complexității lor structurale, fie din cauza impreciziei cu care pot fi măsurați sau deduși parametrii lor. În astfel de situații abordarea sistemică se oprește în fața imposibilității de a utiliza instrumente matematice. Introducerea conceptului de „mulțimi fuzzy" (sau mulțimi vagi) de către L. A. Zadeh în 1965 („Fuzzy sets" în rev. Information and Control, iunie 1965) a constituit un prim pas spre înlăturarea dificultății menționate. Această noțiune se poate explica intuitiv cu ușurință. De exemplu, punîndu-ne întrebarea „ce numere aparțin mulțimii numerelor *mult mai mari* decît 100?" răspunsul este pus în dificultate de formularea vagă a întrebării. „Mult mai mare" este o expresie vagă, o „ambiguitate lingvistică" (linguistic hedge) cum o numește Zadeh. Dacă, în loc să postulăm alternativa strictă a apartenenței sau nonapartenenței unui număr N la mulțimea dată, vom admite că există numere care aparțin în mai mare măsură acestei mulțimi decît altele, am admis implicit că apartenența la o mulțime este o noțiune nuanțată. Se poate introduce o măsură a apartenenței, numită funcție de apartenență, de exemplu

$$fA(N) = \begin{cases} 0, & \text{dacă } N \leqslant 100 \\ \dfrac{N-100}{N}, & \text{dacă } N > 100. \end{cases} \quad (2.9.1.)$$

Funcția de apartenență trebuie să aibă valori între 0 și 1.

Astfel, numărul 101 aparține mulțimii numerelor mult mai mari decît 100 cu funcția de apartenență $f\ A\ (101) = 0{,}01$ iar numărul 1.000.000 aparține aceleiași mulțimi cu funcția de apartenență $f\ A\ (1.000.000) = 0{,}9999$, ceea ce confirmă intuiția inițială că numărul 1.000.000 aparține „în mai mare măsură" mulțimii decît numărul 101.

O mulțime care, fiind definită în mod vag, admite o apartenență nuanțată a elementelor ei și care poate fi exprimată prin funcții de apartenență, se numește mulțime fuzzy.

Dacă mulțimile stărilor și ieșirilor unui sistem sînt mulțimi fuzzy, atunci sîntem în prezența unui sistem fuzzy.

Să considerăm, revenind la un vechi exemplu, sistemul de direcție al unui automobil. Să presupunem că pentru o rotație de n_1 grade a volanului roțile își schimbă direcția cu n_2 grade, iar volanul are un joc de p grade. Notînd cu u unghiul de rotație a volanului și cu y unghiul sub care își schimbă roțile direcția, vom scrie:

$$y = \frac{n_2}{n_1}(u - p). \quad (2.9.2)$$

Dar jocul volanului nu este identic pentru toate automobilele din aceeași serie, iar pentru un același automobil el înregistrează o variație în timp, prin uzură. Mărimea p este o medie, care nu reflectă realitatea particulară a fiecărui automobil. Deci pentru un automobil dat, este mai corect să spunem că unghiul său real de viraj, y, ia valori *în jurul* valorii date de ecuația (2.9.2.). Aceasta demonstrează că pentru o mulțime de automobile identice unghiurile lor de viraj pentru un unghi de rotație dat al volanului formează o mulțime fuzzy, deci sistemul de direcție constituie un sistem fuzzy.

Progresele înregistrate în ultimul deceniu de teoria sistemelor fuzzy au fost extrem de rapide și au condus la implicații semnificative în reformularea analizei unor sisteme naturale, sociale, economice, precum și în abordarea matematică a acestora, apărînd o extensie puternică a ariei investigate de teoria sistemelor. Noutatea domeniului face ca cea mai mare parte a literaturii care-i este consacrată să se găsească sub forma unor articole sau rapoarte de cercetare. Printre volumele de referință putem cita „Mulțimi vagi și aplicațiile lor" de C. V. Negoiță și D. A. Ralescu[20].

2.10. Sisteme automate

Sistemele automate (sau cu reglare automată) sînt sisteme care realizează o anumită funcțiune predeterminată fără a necesita intervenția continuă a unui sistem de conducere (înțelegînd aici și acțiunea omului). Un exemplu de astfel de sistem poate fi considerat un frigider sau un sistem de încălzire cu termostat.

Sistemele automate reprezintă una din principalele aplicații ale teoriei sistemelor, motiv care generează deseori confuzii între calculul și proiectarea sistemelor automate și teoria sistemelor sau între noțiunea de sistem și cea de sistem automat. Pentru înțelegerea funcțiunii principale a sistemelor automate ne vom referi mai întîi la noțiunea de *perturbație*. Definirea intrărilor unui sistem este uneori subiectivă, în sensul că se iau în considerare ca intrări numai acele posibilități de a acționa conștient și controlat asupra sistemului.

[20] Ed. Tehnică, București, 1974.

În cazul unui fond forestier privit ca sistem sînt considerate ca intrări acțiunile de exploatări a masei lemnoase și de reîmpădurire. Cu toate acestea, în realitate există și alte căi de acțiune asupra sistemului: o furtună care doboară o parte din copaci, o specie de paraziți care accentuează degradarea biologică sau, dimpotrivă, condiții climatice mai favorabile decît de obicei care favorizează într-un an înmulțirea naturală, iată cîteva exemple de acțiuni suplimentare asupra sistemului considerat. Aceste acțiuni au o caracteristică comună: sînt întîmplătoare. Din acest motiv ele nu sînt definite ca intrări, ci ca perturbații. În cazul nostru, sistemul nu dispune de un mecanism cauzal care să compenseze efectul perturbațiilor, menținînd echilibrul.

În schimb, mecanismul fiziologic de reglare a temperaturii corpului uman este, între anumite limite, stabil la perturbații. În scopul menținerii temperaturii sale la valoarea de 36°—37°C organismul dispune de două posibilități:

— dacă temperatura ambiantă este ridicată, corpul este apărat de creșterea temperaturii proprii prin transpirație, a cărei evaporare consumă o cantitate de căldură;

— dacă temperatura mediului este scăzută, are loc o vasoconstricție superficială, ceea ce încetinește circulația periferică împiedicînd scăderea temperaturii sîngelui.

Bineînțeles, aceste două procese de reglare a temperaturii nu pot avea o durată prea mare: în primul caz apare deshidratarea, în al doilea caz, scăderea, fie și încetinită a temperaturii corpului provoacă alterarea unor alte funcții ale organismului. Comportamentul termostatic al organismului pe intervale nu prea mari de timp și între anumite limite de temperatură a mediului ambiant indică prezența

unui sistem automat de reglare a temperaturii corpului.

Legată de noţiunea de perturbaţie apare şi noţiunea de *eroare*.

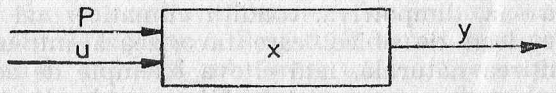


Fig. 9.

Să considerăm un sistem cu o intrare, o stare şi o ieşire supus perturbaţiei. Ecuaţiile sistemului sînt:

$$\begin{cases} x(t+1) = x(t) + u(t) & (2.10.1) \\ y(t) = \alpha x(t) & (2.10.2) \end{cases}$$

iar reprezentarea sa schematică este dată în fig. 9.

Să presupunem că sistemul, a cărui stare $x(t)$ o cunoaştem trebuie să realizeze ieşirea $y^* = A$. În acest caz putem calcula $u(t)$ care trebuie să i se aplice.

Pentru aceasta, vom determina mai întîi starea $x(t+1)$ în care trebuie să ajungă sistemul:

$$x^*(t+1) = \frac{A}{\alpha}. \qquad (2.10.3)$$

În acest caz $u(t)$ va fi:

$$u^*(t) = \frac{A}{\alpha} - x(t). \qquad (2.10.4)$$

În realitate, ţinînd seama şi de efectul perturbaţiei vom avea:

$$x(t+1) = x(t) + \frac{A}{\alpha} - x(t) + P(t) = \frac{A}{\alpha} + P(t) \qquad (2.10.5)$$

$$y(t+1) = A + \alpha P(t). \qquad (2.10.6)$$

Depăşirea valorii prescrise a lui $y(t+1)$ face necesară o nouă comandă:

$$u(t+1) = -P(t) \qquad (2.10.7)$$

care să ducă sistemul la starea şi ieşirea prescrisă.

Vom numi *eroare* diferenţa dintre ieşirea prescrisă şi cea reală. Obiectul sistemului luat ca exemplu este anularea erorii. Acest lucru se face observînd de fiecare dată eroarea şi aplicînd o intrare $u(t)$ care să conducă la anularea erorii. Dacă se poate realiza un alt sistem care să aibă ca intrare eroarea şi ca ieşire comanda $u(t)$ de anulare a erorii sîntem în prezenţa unui sistem automat care include sistemul de conducere (sau reglaj) şi sistemul condus (reglat) aşa cum se vede în fig. 10.

În cazul nostru eroarea este:

$$e(t) = A - y(t) \qquad (2.10.8)$$

iar comanda de anulare a erorii este:

$$u(t) = \frac{A}{\alpha} - x(t) = \frac{A - y(t)}{\alpha} = \frac{e(t)}{\alpha} \qquad (2.10.9)$$

ceea ce ne arată că sistemul de conducere realizează transformarea erorii în comandă de reglaj.

Sistemul din fig. 10 este un sistem automat cu feedback. Acest sistem urmăreşte realizarea mărimii

prescrise de ieşire din sistemul condus. Sistemul de conducere prelucrează eroarea şi elaborează, fără altă intervenţie din exterior, comanda de anulare a erorii.

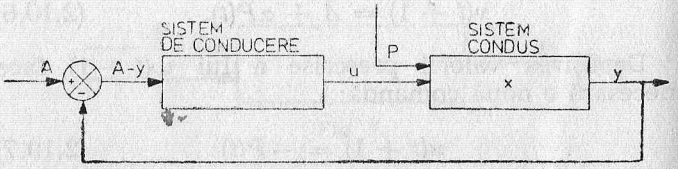


Fig. 10.

Caracteristicile care diferenţiază un sistem automat de alt sistem cu aceeaşi structură şi funcţionare, dar care nu include feedback-ul sînt următoarele:

— *mărirea preciziei.* Sistemul automat funcţionează încontinuu pînă la anularea erorii şi intră din nou în funcţiune ori de cîte ori o nouă perturbaţie reface eroarea;

— *reducerea efectelor perturbaţiilor.* Spre deosebire de un sistem deschis, sistemul automat nu lasă să se acumuleze în timp efectul unor perturbaţii succesive, reacţionînd la fiecare perturbaţie.

Din aceste motive, cele mai multe aplicaţii ale sistemelor automate pot fi întîlnite în tehnică, acolo unde funcţionarea normală a unei instalaţii ar necesita controlul simultan de către om al multor parametri prescrişi şi anularea rapidă a erorilor. De exemplu, într-o instalaţie chimică este necesar să se menţină simultan la valori prescrise temperatura, presiunea şi concentraţia mai multor substanţe. Apariţia unor erori mari de temperatură sau de concentraţie poate compromite calitatea produsului final, iar o eroare de presiune este în măsură să

deterioreze instalaţia. Controlul simultan al întregii instalaţii nu poate fi exercitat de un singur operator, iar mai mulţi operatori pot acţiona contradictoriu. În această situaţie conducerea instalaţiei tehnologice poate fi rezolvată în cadrul unui sistem automat cu feedback.

2.11. **Problemele fundamentale ale teoriei sistemelor**

Orice problemă în care este implicată noţiunea de sistem pleacă de la existenţa, identificată sau presupusă, a unui sistem despre a cărui structură şi funcţionalitate există anumite informaţii. În general, aceste informaţii nu sînt complete; cunoaşterea sistemului, pînă la nivelul care să permită acţiuni conştiente asupra acestuia, rămîne o sarcină care are la bază informaţiile iniţiale.

Teoria sistemelor a apărut ca expresie a necesităţii de a rezolva anumite probleme şi începutul dezvoltării ei a fost marcat explicit de caracterul concret al problemelor respective. Dezvoltarea ulterioară, relativ autonomă, a tehnicilor şi metodelor matematice proprii acestei teorii, reflectă tendinţa teoriei sistemelor de a aborda unitar o problematică din ce în ce mai largă. Stadiul actual al teoriei sistemelor permite să distingem mai multe tipuri de probleme.

2.11.1. *Analiza sistemelor*

Simpla demonstrare sau postulare a existenţei unui sistem nu aduce respectivul sistem în aria acţiunii conştiente a omului. Sînt necesare cunoştinţe despre alcătuirea sistemului, despre relaţiile dintre elementele sale, despre modul său de interacţiune cu mediul

exterior. Dobîndirea acestor cunoştinţe reclamă un efort cognitiv al cărui specific este *analiza de sistem*. Modalităţile analizei sînt multiple: observare, experiment, deducţie, analogie, apelul la ele fiind dictat de natura sistemului. Chiar dacă analiza de sistem nu conduce întotdeauna la formularea unui model matematic al sistemului, ea presupune dobîndirea de informaţii asupra intrărilor, stărilor şi ieşirilor sistemului, precum şi asupra relaţiilor dintre acestea, ceea ce o confundă parţial cu modelarea. În exemplele de sisteme date anterior (automobilul, sistemul ecologic cu două specii, fondul forestier etc.) se poate distinge o fază de analiză în descrierea funcţionării sistemelor respective, înainte de a explicita prin relaţii matematice modul de funcţionare. Tot în sfera analizei de sistem intră şi determinarea unor proprietăţi ale sistemului: stabilitate, controlabilitate etc. care, avînd o definiţie matematică precisă, pot fi studiate numai dacă există un model al sistemului, adică o reprezentare matematică a acestuia, la care să fie raportate definiţiile respective.

Analiza de sistem se aplică, în cea mai mare parte din cazuri, sistemelor naturale, economice, sociale etc. a căror cunoaştere este indispensabilă intervenţiei conştiente a omului. Complexitatea acestor sisteme a condus la integrarea în arsenalul de metode al analizei sistematice a unui spectru larg de tehnici derivate din analiza matematică clasică, cercetarea operaţională, logica modernă. Transpunerea unor concepte proprii ştiinţelor naturii sau ştiinţelor economice în termenii acestor metode, adaptarea metodelor de analiză la particularităţile acestor clase de sisteme au conferit analizei de sistem un pronunţat caracter interdisciplinar.

2.11.2. *Sinteza sistemelor*

Sinteza este operaţia inversă analizei. Dacă analiza determină structura şi funcţionalitatea unui sistem pornind de la existenţa acestuia, sinteza răspunde la problema construirii sub formă abstractă (ca model) sau fizică a unui sistem care să aibă o anumită funcţionalitate şi anumite proprietăţi, îndeplinind condiţia esenţială de realizabilitate fizică menţionată la § 2.1.

De exemplu, un transformator de curent alternativ care să realizeze coborîrea tensiunii din primar la jumătatea acesteia este rezultatul unei sinteze. Impunîndu-se această funcţiune (ieşirea să fie egală cu 1/2 din valoarea intrării) precum şi caracterul mărimilor de intrare şi ieşire (tensiunea curentului alternativ) rezultatul sintezei este un model matematic (proiect) al transformatorului respectiv. Aceeaşi funcţiune impusă, dar cu un alt caracter al mărimilor de intrare şi ieşire (turaţia unui arbore) conduce la un reductor de turaţie cu roţi dinţate sau de fricţiune.

Este important de observat că, din punct de vedere al teoriei sistemelor, se poate face abstracţie de natura fizică a mărimilor care caracterizează un sistem. Din acest motiv, sinteza unui sistem cu o anumită funcţionalitate conduce la posibilitatea de a *realiza fizic* o întreagă clasă de sisteme care diferă structural numai prin natura fizică a mărimilor care le caracterizează. Sinteza poate fi orientată şi către obţinerea unor anumite performanţe ale sistemului. Prin performanţă vom înţelege o anumită relaţie între intrări, stări şi ieşiri, care nu este proprie sistemului, dar căreia i se impune să ia valori maxime sau minime în cazul sistemului dat. Realizarea unei astfel de performanţe face ca sis-

temul să fie *optimal* și poate avea loc în două cazuri:

— dacă se determină pentru un sistem dat o anumită funcție de intrare $u(t)$ pentru care performanța ia valori extreme. Aici este vorba de optimizarea sistemului;

— dacă sistemul este astfel conceput încît pentru orice intrare performanța să fie extremă. În acest al doilea caz, este evident că optimalitatea sistemului este o cerință de la care pornește sinteza.

Sinteza sistemelor are aplicații deosebite în tehnică, unde problema esențială este realizarea unor sisteme cu funcționalitate, proprietăți și performanțe bine precizate. Îndeosebi, proiectarea și realizarea sistemelor automate[20bis], constituie atît aplicația principală cît și terenul pe care se dezvoltă sinteza sistemelor.

2.11.3. *Conducerea sistemelor*

Din punct de vedere aplicativ, acesta constituie cea mai importantă problemă a teoriei sistemelor și ei i se subsumează atît analiza cît și sinteza.

Acțiunea conștientă a omului asupra sistemelor — scop în care se efectuează analiza de sistem — constă de fapt în găsirea acelor intrări care produc o ieșire concordantă sau „cît mai apropiată" de obiectivele funcționării sistemului sau, în general, realizarea unei anumite performanțe. Tot în scopul realizării funcționalității sau performanțelor dorite se recurge la sinteza sistemelor.

Conducerea sistemului — automobil înseamnă aducerea lui dintr-un anumit punct P_0 în punctul de destinație P. Spațiul parcurs se poate exprima ca funcție de cele două ieșiri: viteza și direcția de deplasare, deci conducerea sistemului înseamnă determinarea intrărilor care — prin efectul lor asupra ieșirilor — produc realizarea performanței de schimbare a poziției sistemului din P_0 în P_d.

Conducerea unui sistem economic — o întreprindere industrială, de exemplu — urmărește realizarea unor performanțe specifice sistemului: maximizarea beneficiilor și a productivității, minimizarea costurilor de producție etc. Aceste performanțe sînt funcții de intrările și stările sistemului (ele depind și de ieșiri care, însă, se exprimă tot în funcție de stări). Din nou, problema conducerii sistemului revine la căutarea intrărilor (volumul și structura planului, nivelul dotării tehnice, cantitatea de forță de muncă, necesarul de materie primă, modul de eșalonare în timp a producției) care sînt în măsură să asigure performanțele avute în vedere.

Modalitățile concrete de a rezolva conducerea sistemelor sînt multiple. Alături de metodele matematice, continuă să joace un rol specific experiența și intuiția umană, mai ales în cazul sistemelor foarte complexe. Două din aceste metode: simularea și optimizarea, vor fi analizate în capitolul următor.

[20bis] C. J. SAVANT, *Calculul sistemelor automate*, Ed. Tehnică, București, 1967.

3. SISTEM ŞI MODEL

În termenii definiţiei generale a sistemului, fiind dată structura unui sistem, caracterizarea completă a acestuia implică cunoaşterea mecanismului cauzal $u \rightarrow y$, adică stabilirea corespondenţei biunivoce între spaţiul intrărilor şi spaţiul ieşirilor. Identificarea mulţimii tuturor perechilor (u, y) constituie analiza sistemului, adică determinarea comportamentului (ieşirii) la un anumit stimul (intrare). Analiza sistemului este posibilă fie pe cale experimentală, fie pe cale teoretică. În primul caz, experimentul care se efectuează poate fi total, parţial sau indirect.

Condiţia necesară, dar nu şi suficientă, a experimentului total este accesibilitatea sistemului. Dacă este fizic posibil să se acţioneze asupra tuturor intrărilor sistemului şi să se observe toate ieşirile, atunci experimentul total este posibil. Un receptor de televiziune cu n canale, prevăzut cu reglajele de imagine şi sunet necesare, constituie un sistem asupra căruia se poate face un experiment total. Comutînd selectorul de canale pe toate poziţiile şi reglînd de fiecare dată imaginea şi sunetul vom identifica n perechi canal-imagine şi sunet dintr-o anumită emisiune.

Într-un automobil care staţionează cu motorul oprit se pot face experimente asupra instalaţiei sale electrice, identificînd comenzile care acţionează asupra stingerii şi aprinderii luminilor, pornirii ştergătoarelor de parbriz sau a radioului de bord. În schimb, nu se pot experimenta schimbarea direcţiei sau a vitezei de deplasare. Deci experimentul care se poate face este parţial.

Atunci cînd se proiectează un pod rutier sau de cale ferată a cărui comportare la şocuri, solicitări sau vibraţii trebuie să fie cunoscute, experimentele necesare nu se fac asupra podului, după ce a fost construit, deoarece pot fi distructive, ci au loc asupra unei copii reduse, o machetă a podului. Experimentul este în acest caz indirect.

Există însă situaţii în care natura sistemului nu permite nici măcar un experiment parţial sau indirect. Singura posibilitate care rămîne deschisă este aceea de a studia comportarea sistemului descriindu-l cu ajutorul unor ecuaţii care să reproducă relaţiile între intrările, stările şi ieşirile sale. Evident, acest lucru este posibil dacă se cunoaşte structura sistemului.

Vom adopta următoarea definiţie a modelului: „... un model M al unui sistem S este un alt sistem S', care din anumite puncte de vedere este echivalent cu S, $S' \sim S$ şi care poate fi studiat mai uşor decît S"[21].

Această definiţie este adecvată atît în cazul experimentului indirect, cît şi atunci cînd se recurge la un model abstract care reproduce sistemul prin relaţiile dintre intrările, stările şi ieşirile sale.

[21] EDMOND NICOLAU, *Analogie, modelare, simulare cibernetică*, Editura ştiinţifică şi enciclopedică, Bucureşti, 1977, p. 82.

Echivalența *din anumite puncte de vedere* dintre sistem și model, pe care o presupune definiția modelului, este justificată. Astfel, între un pod și macheta sa există echivalențe morfologice, fizice, dar nu există o echivalență dimensională. Modelul matematic al coexistenței celor două specii reflectă latura cantitativă a interacțiunii lor în timp, dar nu este relevant în ceea ce privește interacțiunea fiecărei specii cu ansamblul mediului înconjurător. Modelul M trebuie să fie considerat ca o aproximare convenabilă a sistemului.

Asupra analogiei dintre sistem și model pot fi făcute o serie de considerații[22] care, deși foarte relevante, depășesc cadrul acestei lucrări.

Studiul unui sistem prin intermediul modelului său fizic (macheta sistemului) sau abstract (matematic) se subordonează unor obiective care determină din ce punct de vedere este necesar ca modelul să fie echivalent cu sistemul. Aceste obiective constituie și un mod de clasificare a modelelor[23]:

— dacă se urmărește studiul comportării sistemului, modelul asociat trebuie să fie echivalent cu sistemul sub raportul evoluției în timp. Toate modelele dinamice sînt modele ale comportamentului unui sistem;

— dacă este necesară identificarea structurii unui sistem, modelul trebuie să reflecte mulțimea elementelor sistemului și mulțimea legăturilor dintre elemente. Astfel, o planșă anatomică reprezintă modelul structural al aparatului respirator, de exemplu, fără a da indicații asupra comportării acestuia;

[22] *Idem*, p. 53—70.

[23] G. J. KLIR, *General Systems Theory*, Van Nostrand, 1967.

— o altă categorie de modele sînt echivalente cu sistemul în privința succesiunii de stări prin care trece sistemul, fără ca această succesiune să fie determinată temporal. Un semafor electric poate avea

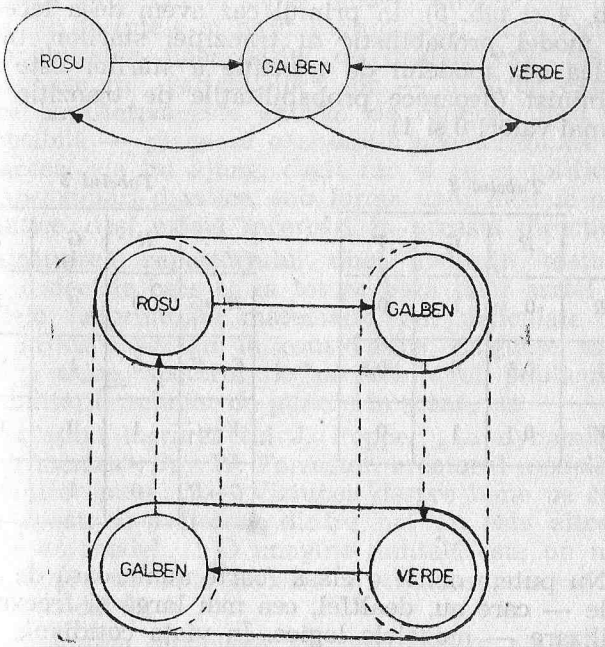


Fig. 11.

trei stări: culorile roșu, galben și verde. După culorile roșu sau verde urmează obligatoriu culoarea galben, iar după culoarea galben, pot urma fie culoarea roșie, fie culoarea verde. Pentru un observator care la momentul t_0 identifică o anumită culoare, modelul tranziției stărilor este redat în fig. 11.

Se impune precizarea că dacă sînt cunoscute stările la momentele t_0 și t_1, starea la momentul t_2 este imediat previzibilă.

Astfel de modele se pot exprima probabilistic prin matrici de probabilități a tranzițiilor de stare (tab. 4 și tab. 5). În primul caz avem de-a face cu un model probabilistic al tranziției stărilor, în al doilea caz modelul de tranziție a stărilor este determinist (deoarece probabilitățile de tranziție iau numai valori 0 și 1).

Tabelul 4

	R	*G*	*V*
R	0	1	0
G	0,5	0	0,5
V	0	1	0

Tabelul 5

	R	*G*	*V*
R→*G*	0	0	1
G→*V*	0	1	0
V→*G*	1	0	0
G→*R*	0	1	0

Nu putem omite o clasă foarte numeroasă de modele — care au, dealtfel, cea mai largă și frecventă utilizare — modelele logice. În viața cotidiană, fiecare om are de luat numeroase decizii, de importanță mai mare sau mai mică, cu implicații mai profunde sau mai superficiale. Fără a căuta exemple mai complicate, să analizăm procesul de alegere a profesiei. De regulă, o decizie în acest sens nu se ia experimentînd mai multe profesii. La această decizie se ajunge construind o serie de „modele" alternative care descriu exigențele fiecărei profesii

tipul și nivelul aptitudinilor necesare, modalitățile de realizare pe plan profesional și social, perspectivele profesiei etc. Odată construite aceste modele, subiectul decident își raportează propriile aspirații și aptitudini la ele și, în general, decizia reflectă alegerea profesiei al cărei model coincide cel mai bine cu dorințele și posibilitățile celui care decide. Complexitatea unor astfel de modele este foarte mare, asupra „variabilelor" lor — a căror exprimare cantitativă este extrem de dificilă, dacă nu imposibilă — planează o anumită nedeterminare și, de aceea, ele nu ajung, decît rar și cu simplificări de aproximări drastice, sub forma unor modele matematice, deși există încercări în această direcție.[24]

Alcătuirea repertoriului unei instituții teatrale este o decizie care se ia tot pe baza unor astfel de modele neformulate matematic, dar articulate logic, în care se iau în considerare: exigențe estetice și etice, spectrul de preferințe al publicului, posibilitățile tehnice de punere în scenă, etc.

Prefațînd lucrarea lui J. Popper „La dynamique des systèmes", Jay W. Forrester, creatorul modelării dinamice spune: „... Viziunea despre lume pe care și-a construit-o fiecare dintre noi nu este altceva decît un model... O imagine mintală este un model. Toate deciziile noastre sînt luate pornind de la un model"[25].

Necesitatea modelelor ca instrumente ale investigației științifice a generat orientări semnificative

[24] F. MAHLER, D. RĂDULESCU, *Un modèle mathématique à fonction prévisionelle pour les options professionelles*, comunicare la cea de-a 3-a Conferință Mondială de Cercetare a Viitorului, București, sept. 1972.

[25] J. POPPER, *„La dynamique des systèmes"*, Les Editions d'Organisation, Paris, 1973.

în știința contemporană. Acolo unde experimentul direct nu mai este posibil, fizicianul, economistul, biologul, conducătorul de întreprindere sau astronomul recurg la modele ale realității pe care o studiază. Lucrări de prestigiu[26] au arătat, de exemplu, că limitele observării directe sau ale experimentului în înțelegerea funcționării sistemului nervos pot fi substanțial depășite recurgînd la modele matematice ale acestuia. Limitele conducerii întreprinderii numai prin „intuiție și experiență", devenite evidente în condițiile întreprinderilor industriale complexe de astăzi, au putut fi depășite utilizînd modele ale întreprinderii[27] în scopul prevederii evoluției acesteia în raport cu factorii care o influențează: natura și volumul producției, al aprovizionării și desfacerii etc.

După cum s-a arătat în capitolul precedent, una din problemele fundamentale ale teoriei sistemelor este conducerea sistemelor, adică determinarea unei secvențe continue ($u(t)$, $0 \leqslant t \leqslant N$) sau discrete ($u(k)$, $k \in [0, 1, 2, \ldots, N]$) de intrări care realizează o anumită stare impusă sau o relație extremală între stări și ieșiri. Problema conducerii sistemelor este strîns legată de aceea a modelării, întrucît aflarea secvenței de intrări sau a *strategiei* necesare se face cu ajutorul modelului unui sistem dat. Aplicații deosebit de largi își găsește modelarea în conducerea sistemelor economice[28].

[26] EDMOND NICOLAU, C. BĂLĂCEANU, *Personalitatea umană — o interpretare cibernetică*, Ed. Junimea, Iași, 1973.

[27] J. W. FORRESTER, *Industrial Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1961.

[28] P. CONSTANTINESCU, C. V. NEGOIȚĂ, *Sistemele informatice, modele ale conducerii și sistemului condus*, Ed. Tehnică, București, 1975.

3.1. Metode de modelare a sistemelor

Nu se poate încă vorbi despre o știință a modelării sistemelor. Nu există metode-standard care să conducă direct de la sistem — indiferent de natura și proprietățile sale — la modelul său matematic. Pe de altă parte, particularitățile unor clase de sisteme fac necesare anumite metode matematice de modelare, în timp ce alte metode rămîn inutilizabile în cazul respectiv.

O mare parte a sistemelor tehnice pot fi descrise prin seturi de ecuații diferențiale. Rețelele electrice pasive (formate din rezistori, bobine de inductanță și condensatori) formează o clasă de sisteme continue pentru care este caracteristică modelarea prin ecuații diferențiale.

Sistemele economice admit în general modele de tip discret. Aceste modele conțin ecuații cu diferențe care constituie o aproximare discretă a ecuațiilor diferențiale. Discretizarea este necesară întrucît facilitează utilizarea tehnicii de calcul, mai ales pentru modele de dimensiuni mari (specifice sistemelor economice) și posibilă deoarece scara de timp la care se petrec procesele economice este mult mai mare decît cea la care au loc fenomene fizice. Din acest motiv, este ușor de înțeles că înlocuirea intervalului continuu de timp $[0, T]$ cu mulțimea de momente $[0, 1, 2, \ldots T]$ nu duce la pierderea de informații despre evoluția sistemului.

Sistemele a căror structură poate fi cunoscută precis și a căror funcționalitate este guvernată de legi precise, deterministe pot fi modelate utilizînd tehnici matematice deterministe. Astfel de sisteme sînt caracterizate de faptul că relațiile dintre elementele lor sînt expresii ale unor legi fizice. Alături de aceste sisteme, există sisteme la care valoa-

rea numerică a unei variabile nu poate fi cunoscută exact, ci definită prin densitatea ei de probabilitate sau apartenența la o mulțime fuzzy. Evident, metodele de modelare utilizate trebuie să fie în acord

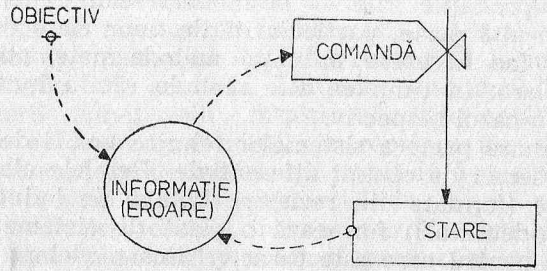


Fig. 12.

cu caracterul nedeterminist al variabilelor. O metodă de modelare relativ simplă și riguroasă, beneficiind de o mare suplețe și larg aplicată în modelarea matematică a fenomenelor economice este cea elaborată de Jay W. Forrester, numită „dinamica sistemelor"[29].

În cadrul acestei metode care își asociază și o procedură simplă de reprezentare grafică simbolică a sistemelor precum și un mod standard de scriere a ecuațiilor, orice buclă de reacție are structura unui ciclu informație → comandă (intrare) → stare → ieșire (fig. 12).

Exemplul clasic este cel al unui bazin care trebuie să fie umplut pînă la un anumit nivel. Un operator care are de realizat acest lucru va acționa în modul următor: dacă nivelul real al apei se află sub nivelul

[29] J. W. FORRESTER, *Principles of Systems*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1971.

dorit, va lăsa să curgă robinetul de umplere cu un anumit debit. Pe măsură ce nivelul apei se apropie de nivelul dorit, el va închide progresiv robinetul pentru a-l putea închide cu totul în momentul atingerii nivelului dorit. În acest caz starea este nivelul apei din bazin, intrarea este debitul (variabil) al robinetului, iar informația, pe baza căreia se acționează asupra intrării, este diferența sesizată de ochiul operatorului între nivelul cerut (obiectivul sistemului) și nivelul real. Se presupune că modificarea debitului nu are loc în mod continuu ci la intervale egale de timp, a căror durată o notăm cu DT, iar capetele intervalelor succesive se notează cu 0, 1, 2, ... J, K .... În acest caz, notînd cu $N.K$ nivelul apei la momentul K și cu $R.JK$ ritmul de creștere a nivelului pe intervalul de timp DT de la momentul J la momentul K, vom putea scrie:

$$N.K = N.J + D.T + R.JK. \qquad (3.1.1)$$

Această ecuație, numită ecuație de nivel (chiar dacă semnificația fizică a stării este alta decît cea de nivel) exprimă faptul că, de la momentul J la momentul K, nivelul apei din bazin crește cu $DT \cdot R.JK$ unități. Constanta C transformă unitatea de măsură a debitului în unități de măsură a nivelului astfel că:

$$R.JK = C.D.J. \qquad (3.1.2)$$

La momentul K operatorul, observînd că nivelul apei s-a apropiat de cel dorit, reduce debitul la valoarea $D.K$. Este de presupus că debitul va fi reglat proporțional cu diferența de nivel $ND - N.K$:

$$D.K = \sigma(ND - N.K) \qquad (3.1.3)$$

unde constanta σ are semnificația:

$$\sigma = \frac{1}{T} \cdot \frac{\text{litri}}{\text{cm}},$$

în care T este durata prezumtivă a umplerii bazinului la nivelul dorit.

Informația pe baza căreia se elaborează comanda (intrarea) $R.KL$ este diferența de nivel:

$$I.K = ND - N.K \qquad (3.1.4)$$

adică singura informație pe care o poate avea operatorul.

Se observă că informația avînd dimensiunea unei diferențe de nivel, iar intrarea (ritmul de creștere a nivelului, $R.JK$) avînd dimensiunea unei viteze,

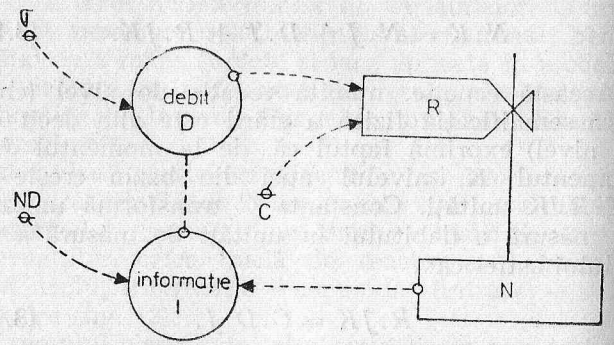


Fig. 13.

între ele au loc o serie de transformări, după cum se vede în fig. 13.

Presupunem că operatorul are acces și la o vană de scurgere a bazinului — dacă nivelul apei a depășit nivelul dorit — deci putem admite și valori negative pentru $I.K$ și $D.K$.

Întrucît sistemul considerat realizează aducerea și menținerea stării la o anumită valoare, feedback-ul prezent între stare și intrare este negativ.

Aceeași structură de sistem — cu o stare și o intrare — poate acționa pe baza unui feedback pozitiv. Fie un sistem definit în modul următor: o unitate productivă lansează un produs nou din gama bunurilor de consum. Cu cît crește vînzarea produsului, cu atît este necesară producerea unor cantități mai mari care să înlocuiască produsele consumate. Presupunînd că politica de stocuri este desfacerea oricărui stoc existent într-o perioadă de TD săptămîni și că nu există limitări de capacități de producție în afara duratei TE a procesului tehnologic putem trece la elaborarea modelului. Notăm cu $S.K$ volumul stocului la momentul K, cu $RP.KL$ ritmul de producție și cu $RD.KL$ ritmul desfacerii. Ecuațiile modelului vor fi:

$$S.K = S.J + DT.(RP.JK - DR.JK) \qquad (3.1.5)$$

$$RP.KL = \frac{S.K}{TE} \qquad (3.1.6)$$

$$RD.KL = \frac{S.K}{TD} \qquad (3.1.7)$$

iar schema sa, cea din fig. 14.

Se observă că în ambele cazuri analizate, pentru a înlocui recursiv valoarea stării în ecuația intrării și pe cea a intrării în ecuația de stare, este necesar să cunoaștem starea inițială, adică pe $N.O$ respectiv pe $S.O$. În acest fel se pot calcula secvențial succesiunile de stări și intrări.

Vom lua un exemplu numeric pentru fiecare sistem:

$N.O = 100$ cm $\qquad S.O = 1000$ unități

$ND = 200$ cm $\qquad TE = 2$ săptămîni

$\sigma = 1 \dfrac{\text{litru}}{\text{minut} \cdot \text{cm}} \qquad TD = 4$ săptămîni

$c = 0{,}5 \dfrac{\text{cm}}{\text{litru}}$

$DT = 1$ minut

și vom urmări evoluția celor două sisteme pe 5 pași în tabelul 6.

Problematica modelării matematice a sistemelor nu se oprește la faza analizei sistemului. Dacă, în această fază, efortul principal este îndreptat către

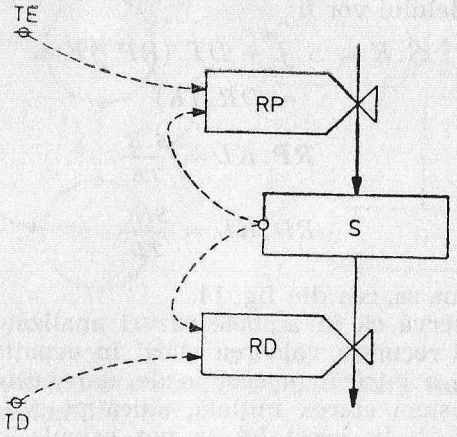


Fig. 14.

identificarea variabilelor și a tipului de relații între ele, în faza următoare se pune problema validării modelului, adică a aprecierii fidelității cu care acesta reflectă sistemul real. În linii mari, validarea unui model se face în felul următor:

Tabelul 6

T	$N.K$	$I.K$	$D.K$	$R.JK$	$S.K$	$RP.JK$	$RD.JK$
0	100	100	100	50	1000	500	250
1	150	50	50	25	1250	625	312
2	175	25	25	12,5	1553	776	388
3	187	12,5	12,5	6,25	1941	970	485
4	193,75	6,25	6,25	3,125	2426	1213	606
5	196,875	3,125	3,125	1,5625	3033	1516	758

— Pentru o perioadă de timp $t \in [t_0, t_f]$ se identifică mulțimea tripletelor intrare—stare—ieșire ale sistemului real:

$$[u^*(t),\ x^*(t),\ y^*(t)],\ t \in [t_0, t_f];$$

— se aplică modelului secvența de intrări $u^*(t)$ și se memorează secvențele de stări și ieșiri ale acestuia $x(t)$ și $y(t)$;

— dacă diferențele $x^*(t) - x(t)$ și $y^*(t) - y(t)$ pot fi considerate nesemnificative pentru perioada de timp avută în vedere concluzia este că sistemul și modelul său au o comportare similară, deci modelul este valid; în cazul apariției unor diferențe marcate, singura concluzie care poate fi trasă este că modelul nu reproduce comportarea sistemului, deci este inutilizabil pentru a-l studia. În acest caz se impune reformularea modelului și adîncirea analizei sistemului.

3.2. Utilizarea modelelor: simulare, prognoză, optimizare

Funcţionarea unei întreprinderi industriale privite ca sistem evidenţiază un comportament complex. Creşterea ritmului de aprovizionare cu materii prime poate duce la eliminarea unor stagnări, deci la mărirea productivităţii dar şi la acumularea unor stocuri supranormative nedorite, care provoacă penalizări financiare. Aceste penalizări pot întîrzia plata furnizorilor de materii prime şi deci scăderea ritmului de aprovizionare. Este limpede că luarea unei decizii de modificare a ritmului de aprovizionare trebuie să ţină seama de multitudinea implicaţiilor posibile.

Popularea unei zone geografice cu o anumită specie de animale poate duce la interacţiuni complexe cu celelalte specii, antrenînd fie dispariţia unor specii, fie modificarea raportului de echilibru între alte specii, deci deteriorarea echilibrului ecologic. O astfel de acţiune, căreia nu i se pot cunoaşte toate efectele, riscă să nu-şi realizeze obiectivele sau să le realizeze cu un „preţ" prea mare.

Deci, multe decizii de a acţiona într-un anumit mod asupra unui sistem întîmpină dificultăţi legate de faptul că pe lîngă efectul scontat (sau chiar în locul acestuia) pot apărea efecte nedorite. Una din căile ieşirii din acest impas este *simularea* efectelor utilizînd un model al sistemului. Astfel, fără a afecta sistemul real, simularea cu ajutorul modelelor evidenţiază implicaţiile deciziei (intrării), aducînd informaţii suplimentare. În aceste situaţii, decizia nu mai este un act incert, ci poate fi luată cunoscînd ansamblul efectelor pe care le va produce. O utilizare şi mai deplină a posibilităţilor pe care le oferă simularea, apare în cazul necesităţii de a opta pentru

o anumită variantă de decizie din mai multe posibile.

În anumite cazuri, este necesar să se cunoască comportarea viitoare a unui sistem, chiar dacă nu se are în vedere o decizie de intervenţie asupra sistemului. Simularea efectuată în scopul de a anticipa evoluţia unui sistem se numeşte şi *prognoză*. Un exemplu tipic este prognoza meteorologică. Modalităţile de acţiune asupra fenomenelor atmosferice sînt minime şi nu au caracterul unor decizii. Totuşi cunoaşterea anticipată a acestor fenomene este extrem de utilă. În acest scop, modelele (chiar dacă nu matematice) avînd ca variabile în interacţiune poziţia, mărimea, viteza, temperatura, presiunea şi umiditatea unor mase de aer, conduc la predicţii asupra stării vremii.

Sistemul bazin—robinet—operator poate fi simulat cu ajutorul modelului analizat anterior. Prognoza producţiei şi vînzărilor unui anumit produs se poate obţine cunoscînd starea actuală $S.O$ a stocului şi procedînd la determinarea recurentă a stărilor $S.1$, $S.2$, ... $S.K$ aşa cum s-a exemplificat în tabelul 6.

Un loc central în cadrul aplicaţiilor modelării matematice a sistemelor îl ocupă *optimizarea*. În numeroase situaţii, cunoscînd comportamentul unui sistem atunci cînd i se aplică diferite intrări, este necesar să se rezolve problema inversă: să se determine intrarea pentru care se obţine un anumit comportament (cerut) al sistemului.

În funcţie de tipul sistemelor şi de natura criteriilor de optim există o multitudine de tehnici matematice de optimizare, a căror simplă enumerare ar depăşi cadrul acestei lucrări. În prezent, orice calculator electronic are, în biblioteca sa de programe, algoritmi destinaţi optimizării sistemelor.

Atunci cînd problemele de modelare și de aplicare a modelării (simulare, prognoză, optimizare) se pun în raport cu sisteme tehnice (o instalație tehnologică), economice (o întreprindere productivă), biologice, ecologice, etc. conduse de om, putem conchide că aplicațiile modelării matematice se înscriu pe linia conducerii acestor sisteme, întrucît au drept rol fundamentarea științifică a deciziilor de conducere. Existența tehnicii de calcul electronic permite conducerea optimală a unor sisteme complexe (întreprinderea industrială, sisteme de transport și aprovizionare, zonarea suprafețelor agricole etc.).

3.3. Rolul modelelor în analiza, sinteza și conducerea sistemelor

Cele arătate pînă acum pot lăsa convingerea că modelul unui sistem se obține plecînd de la o analiză a sistemului respectiv și că existența sistemului precede existența modelului. Totuși, după cum ne amintim, sinteza sistemelor are ca scop realizarea unui sistem cu funcțiuni date. Rezultatul sintezei îl constituie un model care exprimă structura și relațiile intrare—stare—ieșire care sînt caracteristice sistemului cerut. Deci, modelul face posibilă realizarea sistemului.

Este ușor de observat că în timp ce un sistem cum ar fi sistemul ecologic există independent de modelul său (care este rezultatul analizei) și își precede modelul, alte sisteme, de exemplu un electromotor sau un sistem automat de conducere a unei instalații tehnologice, succed modelului lor care rezultă din *sinteză*. Credem că nu greșim dacă vom considera că *proiectul* unui sistem tehnic constituie un model matematic al acestuia.

Rolul modelului este foarte important în *conducerea* sistemelor. Am arătat că două modalități de a găsi strategiile (secvențe de intrări) care realizează un comportament cerut al sistemului sînt simularea și optimizarea.

Să presupunem că pentru conducerea unei întreprinderi industriale s-au elaborat mai multe strategii posibile. În acest caz simularea efectelor fiecărei strategii permite compararea lor, alegerea strategiei care dă cele mai bune rezultate și, deci, conducerea efectivă a sistemului pe baza ei.

Modelul devine un auxiliar de neînlocuit al conducerii acelor sisteme care, prin natura lor, sînt mai puțin accesibile experimentului direct. Experimentarea unei strategii greșite de conducere a unui sistem ecologic poate antrena modificări nedorite și ireversibile ale mediului înconjurător, după cum aplicarea, chiar și experimentală, a unei strategii greșite de conducere a unui sistem tehnic sau economic poate duce la o funcționare necorespunzătoare sau chiar la degradarea sistemelor respective. În aceste cazuri, cea mai bună soluție este simularea strategiilor pe modelul sistemului respectiv și aplicarea unei strategii numai dacă rezultatele ei simulate se dovedesc satisfăcătoare.

Tot din punct de vedere al conducerii, atunci cînd avem de-a face cu un sistem optimal automat (vezi 3.2) adică cu o pereche sistem condus—sistem de conducere optimală, observăm că analiza și sinteza sistemelor se subordonează obiectivului conducerii. Realizarea acestei perechi implică în mod distinct: *a*) *analiza* sistemului condus; *b*) *sinteza* sistemului de conducere; *c*) *conducerea* efectivă.

Conducerea sistemelor tehnice și economice pe baza conceptelor teoriei sistemelor și a utilizării teh-

nicii de calcul constituie astăzi o tendință în plină afirmare și una din direcțiile revoluției științifice și tehnice contemporane.

3.4. Problematica sistemelor mari

Aplicarea pe scară largă a metodelor și tehnicilor derivate din teoria sistemelor a condus la identificarea în numeroase domenii (tehnică, biologie, economie, științele sociale) a unor sisteme de dimensiuni mari, denumite pe scurt *sisteme mari* (large systems).

Prin sisteme mari înțelegem acele sisteme în care numărul variabilelor de comandă, al variabilelor de stare și al condițiilor (restricțiilor) de evoluție a acestora este mare în raport cu disponibilitățile de memorie și viteză de calcul ale calculatoarelor existente.

Această clasă de sisteme se referă deci la procese cu un număr mare de elemente în interacțiune, avînd o complexitate ridicată. Sinteza deciziei pentru asemenea sisteme este o sarcină dificilă chiar pentru cele mai performante calculatoare electronice aflate în prezent în dotarea utilizatorilor de tehnică de calcul. De aceea, analiza atentă în faza de modelare a sistemelor susceptibile de a comporta un număr mare de ecuații și variabile, în vederea reducerii acestora fără modificarea soluției, este o etapă indispensabilă, ce facilitează soluționarea acestor sisteme cu ajutorul tehnicii de calcul existente.

Această analiză se justifică din mai multe motive și anume:

— în sistemele mari, îndeosebi din domeniile social, economic și biologic, imprecizia datelor cu care se operează este de regulă mare, așa încît luarea în

considerare a unui mare număr de parametri și relații face să se transfere sau să se amplifice imprecizia la nivelul rezultatelor, respectiv al deciziei;

— considerarea unui număr mare de parametri în interacțiune poate conduce, potrivit legilor statisticii, la anularea reciprocă a efectelor astfel încît, la nivelul rezultatelor, influența acestora riscă să devină nesemnificativă;

— în activitatea de modelare a sistemelor mari se întîmplă deseori să se scrie ecuații care se regăsesc sub o altă formă în relațiile scrise anterior. Aceste ecuații se numesc redundante și nu influențează soluția sistemului. Ele pot fi eliminate pentru a nu solicita inutil capacitatea de calcul aflată la dispoziția utilizatorilor.

Sistemele de ecuații trecute prin filtrul acestei analize sînt apoi încadrate într-o anumită clasă de metode matematice care conține tehnici și algoritmi pentru sinteza soluției.

Metodele matematice de soluționare a sistemelor de ecuații de dimensiuni mari se pot împărți în două clase: metode directe și tehnici de descompunere și partiționare.

Metodele directe specializează un algoritm deja existent la o clasă de probleme particulare. Ele sînt cel mai des întîlnite de exemplu în programarea liniară, unde instrumentul principal este algoritmul simplex. Utilizarea metodelor directe în studiul sistemelor mari face uneori necesară construirea unor algoritmi specializați, care să exploateze structura particulară a sistemului.

Metodele indirecte se caracterizează prin descompunerea problemei originale în subsisteme, fiecăruia corespunzîndu-i o subproblemă mai mică, independentă. Deoarece subsistemele interacționează, rezolvarea subproblemelor nu va furniza în general

soluția corectă. Abordarea *ierarhizată* a problemei propune ca, ținînd seama de interacțiuni, să se definească unul sau mai multe subsisteme ca fiind situate la „nivelul doi", care să influențeze într-un

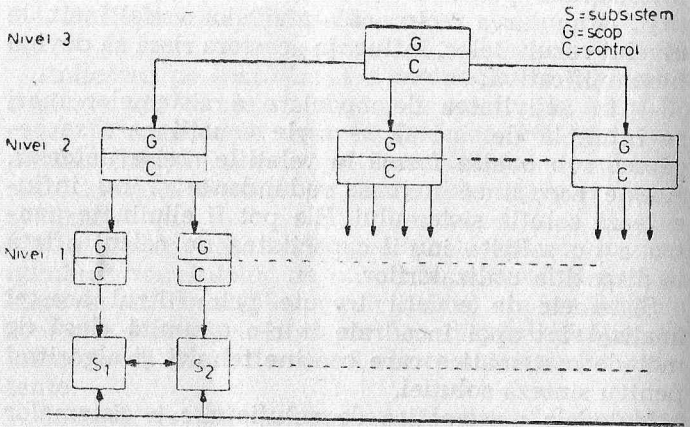


Fig. 15.

mod anumit subsistemele originale definite ca fiind la „nivelul întîi". Această influență poate lua forme numeroase în funcție de problema originală de natura *descompunerii* de la primul nivel etc. și de aceasta trebuie neapărat să se țină seama atunci cînd inițial se descompune sistemul.

Scopul nivelului doi este de *a coordona* în așa fel comportamentul subsistemelor de la primul nivel, încît să se obțină soluția problemei originale.

Această idee poate fi extinsă prin definirea subsistemelor de la nivelul trei, fiecare dintre acestea coordonînd un număr de subsisteme de la nivelul doi etc. Structura rezultată are forma unei piramide a unităților decizionale, cum este arătat în fig. 15.

Analiza și conducerea sistemelor mari, tratate ca sisteme ierarhizate, dispun de un arsenal de tehnici matematice a căror complexitate face dificilă prezentarea lor, chiar sumară, în cadrul acestei lucrări. Pînă în prezent nu s-au elaborat metode generale și unitare de tratare a sistemelor ierarhizate. Abundența metodelor particulare, specializate, nu trebuie interpretată decît ca o consecință a marii diversități structurale și funcționale a sistemelor mari. Adevărul dialectic potrivit căruia acumulările cantitative duc la modificări calitative se impune în mod evident: un sistem mare nu este caracterizat numai prin dimensiunea sa ci și printr-o diversitate structurală care necesită mai mult decît simpla extindere a metodelor clasice. În acest sens, imprecizia asociată sistemelor de dimensiune mare creează posibilități fructuoase de aplicare a metodelor specifice sistemelor fuzzy.

3.5. Utilizarea tehnicii de calcul pentru simularea, prognoza și optimizarea cu ajutorul modelelor

Descrierea sistemelor cu ajutorul modelelor matematice implică utilizarea pe scară largă a tehnicii de calcul pentru soluționarea rapidă a acestora.

Modelul matematic este elementul central al unui sistem decizional care utilizează tehnica de calcul electronică. Spre el se îndreaptă datele privind funcționarea sistemului real pentru a fi prelucrate în vederea sintezei soluției și de la el se întorc rezultatele, respectiv deciziile care vor orienta sistemul real către un comportament optimal în raport cu condiții și criterii prestabilite.

În sistemele informatice moderne, datele de intrare ale modelelor matematice de simulare, prog-

noză și optimizare sînt organizate sub forma bazelor de date în care se centralizează după principii unitare datele primare privind evoluția sistemului real (fig. 16).

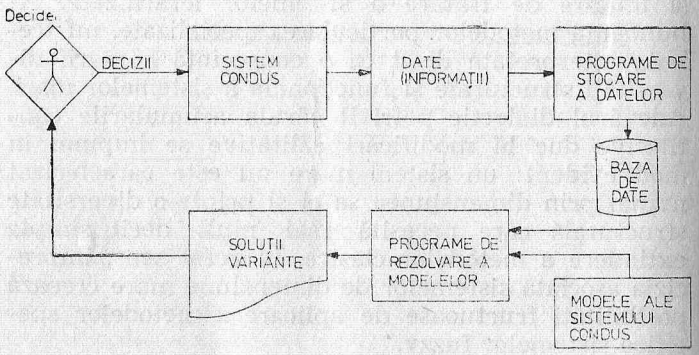


Fig. 16.

Schema de principiu redă elementele ce compun un sistem informatic de decizie economică, ce utilizează modele matematice pentru simularea, prognoza și optimizarea proceselor de producție ale întreprinderilor economice.

Algoritmii de calcul a soluțiilor modelelor generate sînt încorporați în pachete de programe care prelucrează datele modelelor matematice aflate pe suporții magnetici; de asemenea aceste pachete listează (afișează) soluția sub formă de tabele și grafice astfel încît să se faciliteze analiza acesteia de către factorul de decizie.

Calculatoarele electronice moderne dispun de programe performante pentru soluționarea unor modele matematice de dimensiuni relativ mari care

apar în urma modelării proceselor din diferite domenii de aplicații.

Soluțiile și variantele determinate de pachetele de programe sînt înaintate unui factor de decizie, care, în cazul proceselor economice rămîne în continuare omul, ce aduce asupra deciziei finale experiența, intuiția, talentul și fantezia proprie naturii umane.

Decizia finală poate fi luată direct de calculator numai în cazurile în care ea devine o rutină ce ocupă în mod inutil timpul de lucru al factorului de decizie uman.

Pe măsură ce crește complexitatea sistemelor reale, scade de regulă posibilitatea de automatizare a luării deciziei, de conducere a sistemelor reale. Această complexitate reglează raportul dintre partea automatizată și cea neautomatizată a activității de decizie. Datorită pătrunderii masive a calculatorului electronic în activitatea cotidiană, asistăm la preluarea de către acesta a sarcinilor de decizie de rutină care pot fi formalizate (modelate) și deci automatizate.

Deși la prima vedere am putea trage concluzia că s-ar îngusta cîmpul de decizie umană prin preluarea de către calculator a unor activități, acest lucru este numai aparent, deoarece zona deciziilor neformalizate nu numai că este foarte vastă, dar crește pe măsura creșterii gradului de cunoaștere a realității înconjurătoare.

În acest context, putem afirma că mașina electronică de calcul nu va putea înlocui complet factorul uman de decizie, ci îl va ajuta progresiv să-și creeze timpul necesar pentru munca de concepție, de cercetare și investigare mai profundă a realității înconjurătoare, lucru pentru care calculatorul rămîne numai un instrument.

4. APLICAȚIILE TEORIEI SISTEMELOR

Multe din domeniile de vîrf ale științei și tehnologiei încorporează rezultate obținute în cadrul teoriei sistemelor.

Ca disciplină tehnico-aplicativă, a cărei expansiune se identifică cu una din coordonatele esențiale ale revoluției științifice și tehnice, automatica și-a făcut din teoria sistemelor principalul instrument teoretic. În biologie, genetică, ecologie, progresele realizate în ultimele două decenii se datorează în bună parte aportului teoriei sistemelor. În aceste direcții, potențialul aplicativ al teoriei sistemelor se prezintă, desigur, în mod diferențiat. Demersul sistemic în științele tehnice este orientat către proiectarea sau îmbunătățirea unor mașini, instalații, dispozitive gravitînd în jurul problemelor de *sinteză și conducere a sistemelor*. În științele naturii și vieții, domeniu în care gradul de complexitate a sistemelor crește considerabil, stadiul actual al aplicării teoriei sistemelor este caracterizat de problemele de *analiză sistemică*, orientată direct către conducerea sistemelor.

Dar cea mai semnificativă pătrundere a teoriei sistemelor a avut loc în științele economice și sociale. Această penetrare a fost, nu de puține ori, pîndită de pericolele reducționismului, străin de concepția materialist-dialectică. Cu toate acestea, explicarea sistemică a unor mecanisme economice și sociale constituie azi o realitate de neignorat, deși, în mod autorizat și legitim, se afirmă opinia că stadiul actual al teoriei sistemelor nu permite încă o abordare integrală a sistemelor economice și sociale. Complexitatea acestora nu se rezumă doar la dimensiune, ea fiind caracteristică mai ales în ce privește natura relațiilor dintre elemente și subsisteme.

Nu toate aceste relații au un caracter legic, iar cauzalitatea pe care o exprimă nu este întotdeauna univocă. Luarea în considerare a acestor rezerve ferește teoria sistemelor de a deveni un „pat al lui Procust" în raport cu anumite clase de sisteme, dar în același timp îi deschide drumul către depășirea limitelor sale de aplicare. Nivelul la care teoria sistemelor se dovedește cea mai activă în domeniul economic și social rămîne, deocamdată, *analiza de sistem*. Nu trebuie să uităm însă că tocmai restricțiile de aplicare a teoriei sistemelor în acest domeniu au sugerat noi contribuții, cum ar fi abordarea nedeterministă de tip fuzzy, extinderea logicii polivalente sau reformularea unor concepte sistemice în cadrul mult mai larg al sistemelor economice și sociale.

În acest capitol vom insista mai puțin asupra aplicațiilor tehnice. Ele sînt cel mai bine cunoscute și și-au găsit locul în paginile multor lucrări. Vom încerca în schimb să relevăm incursiunile teoriei sistemelor în științele naturii, economiei și societății.

4.1. Aplicații tehnice

Primele etape ale introducerii mașinilor în producția de bunuri materiale au fost orientate spre înlocuirea energiei fizice a omului cu cea a mașinii. Totuși mașina, ca sursă de energie trebuia să fie dirijată de om pentru realizarea anumitor obiective. Încă de la începutul acestui secol, însă, conținutul problemei s-a schimbat: trebuia inventată o mașină „inteligentă" care să controleze, în locul omului, activitatea mașinii producătoare de energie, omul rămînînd să elaboreze „programul de acțiune" al celor două mașini.

În acest mod, instalația de încălzire a devenit sistem condus, termostatul și mecanismul de reglare au devenit sistem de conducere iar programul lor de acțiune, stabilit de om, a fost menținerea temperaturii din locuință la valoarea de 20°C. Cele două sisteme au devenit un sistem automat.

Automatizarea proceselor și instalațiilor tehnologice, bazată pe contribuția teoriei sistemelor înseamnă, de fapt, sinteza sistemului de conducere pornind de la analiza sistemului condus. Schema generală a unui sistem automat este redată în fig. 17.

Să presupunem că sistemul condus este o conductă de alimentare cu apă care trebuie să asigure

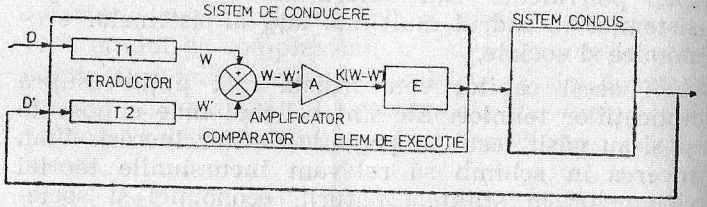


Fig. 17.

un debit constant D. Traductorul T_1 transformă mărimea lui D într-o mărime electrică, de exemplu o tensiune W (el poate fi înlocuit printr-o sursă reglabilă de tensiune), iar traductorul T_2, care poate fi un mic generator acționat de curgerea lichidului prin conductă, transformă debitul real D' într-o tensiune W'. Un element comparator calculează diferența de tensiune $W - W'$ și o aplică unui amplificator A care realizează o tensiune de ieșire $K(W—W')$ acționînd un element de execuție E (de exemplu un electromotor) care în funcție de semnul lui $K(W—W')$ va deschide sau va închide vana de alimentare a conductei. În momentul în care $D=D'$; vom avea în consecință tensiuni nule la intrarea și ieșirea amplificatorului, electromotorul va fi în repaus și debitul va fi menținut pînă la apariția unei eventuale perturbații care, modificînd pe D', va acționa din nou întregul sistem de conducere.

De la acest exemplu simplu și pînă la pilotarea automată a unei rachete, principiul reglării automate se menține același. Ceea ce diferă sînt performanțele (precizie, stabilitate etc.) impuse sistemului de conducere și problemele de ordin tehnologic pe care le ridică obținerea lor.

4.2. Teoria sistemelor în biologie și ecologie

Norbert Wiener, creatorul ciberneticii, a arătat într-o lucrare de răsunet[30], că metodele automaticii tehnice — așa cum se dezvoltase pînă la sfîrșitul deceniului cinci al acestui secol — se pot aplica

[30] N. WIENER, *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine, 1948.*

în studiul organismelor vii. Pe de altă parte, biologia a fost, prin începutul făcut de Ludwig von Bertalanffy, una din rădăcinile teoriei sistemelor.

Realizarea semnificativă a unor aplicații ale teoriei sistemelor în biologie nu s-a lăsat mult aș-

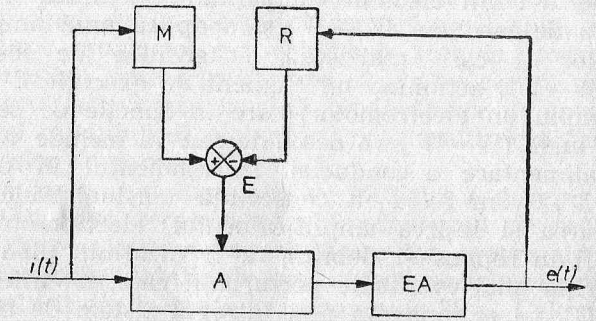


Fig. 18.

teptată. Din multitudinea exemplelor care se pot da, vom reține analiza unuia din mecanismele prin care organismul menține glicemia (concentrația de zahăr în sînge) constantă. După Edmond Nicolau și Constantin Bălăceanu[31] acest mecanism este un *sistem automat adaptiv optimal* a cărui schemă o reproducem după lucrarea citată (fig. 18).

M reprezintă un analizator (traductor) care introduce în detectorul de eroare *E* mărimea de intrare necesară *i* (*t*). Blocul *R* este un analizator (traductor) al mărimii de ieșire *e(t)* care, scăzută din *i(t)*, formează eroarea *E*. Blocul *A*, este acționat de eroare și constituie sistemul de conducere a „elementului automatizat": *EA*.

[31] EDMOND NICOLAU, CONSTANTIN BĂLĂCEANU, *Elemente de neuro-cibernetică*, Editura Științifică, București, 1967, p. 131.

Dacă glicemia *e* (*t*) scade sub valoarea normală, *i* (*t*), atunci $E > 0$ iar *A* emite o comandă tradusă prin senzația de foame care conduce la ingurgitarea unor alimente care conțin glucide. Dacă glicemia depășește valoarea normală ($E < 0$), *A* produce o senzație de vomă avînd ca efect eliminarea unui surplus de glucide.

În mod analog se poate modela comanda mișcărilor complexe (motilitatea).

Preocupările crescînde pentru structura și evoluția mediului înconjurător natural, în condițiile unui impact crescînd între mediul artificial, creat de om și mediul natural, au generat numeroase abordări sistemice ale problematicii ecologice.

Revenind la modelul celor două specii (răpitoare și rozătoare) prezentat în capitolul 2, să examinăm consecințele mai multor variante de comportament ale sistemului considerat:

— dacă se intensifică vînătoarea de răpitoare, va avea loc o accelerare a înmulțirii rozătoarelor. Dacă prin rozătoarele în chestiune vom înțelege dăunători ai culturilor cerealiere, ca hîrciogul, este limpede că va fi afectată negativ recolta de cereale;

— dacă locurile împădurite care adăpostesc răpitoarele sînt defrișate nerațional, are loc o migrație a acestora și se ajunge la un efect similar cu cel anterior;

— combaterea rozătoarelor prin mijloace chimice, toxice și pentru răpitoare, poate antrena dispariția răpitoarelor în condițiile menținerii unui anumit număr de rozătoare care, ulterior, se pot înmulți nestingherit.

Se poate imagina cu ușurință un alt ecosistem format dintr-o specie de pomi fructiferi, o specie de

omizi și o specie de păsări care se hrănesc cu omizi. Tratarea chimică a pomilor cu substanțe stimulatoare de creștere, dar nocive pentru păsări, deschide drum atacului omizilor și compromiterii recoltei.

În prezent studiul proprietăților de stabilitate a sistemelor se dovedește de mare utilitate pentru analiza echilibrului ecologic în condițiile impactului om-natură.

4.3. Întreprinderea industrială ca sistem

Una din aplicațiile majore către care au fost canalizate realizările teoriei sistemelor este conducerea sistemelor om-mașină.

Întreprinderea industrială constituie un astfel de sistem complex în interiorul căruia interacționează variabile avînd ca semnificație fizică:

— forța de muncă,
— utilaje,
— materii prime,
— informații,
— energie,
— produse finite,
— fonduri financiare.

Din teoria conducerii întreprinderilor, obiect a numeroase lucrări de specialitate, sînt cunoscute cele cinci funcțiuni ale întreprinderii:

— cercetare-dezvoltare (incluzînd aici și planificarea și investițiile);

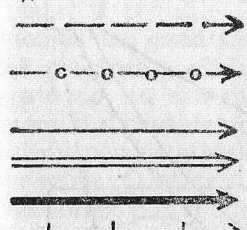
— comercial (aprovizionare cu materii prime și desfacerea produselor finite);

— producție (transformarea materiei prime în produse finite prin intermediul forței de muncă și al utilajelor);

— personal (gestionarea forței de muncă);

— financiar (gospodărirea, prin intermediul băncii, a fondurilor întreprinderii).

Pentru a prezenta o schemă generală a întreprinderii ca sistem vom adopta (după J. W. Forrester), următoarele semne convenționale:



Întreprinderea, împreună cu furnizorii ei de materie primă, energie și utilaje (investiții fizice), banca și beneficiarii produselor finite, poate fi prezentată ca în fig. 19.

Această reprezentare sistemică a întreprinderii industriale împreună cu elementele cu care interacționează permite evidențierea unor fluxuri de: materie primă, produse finite, fonduri, forță de muncă, informații etc. Funcțiunile întreprinderii, considerate ca subsisteme, jalonează aceste fluxuri. De exemplu materia primă are circuitul: furnizor—aprovizionare—producție, produsele finite urmează drumul producție—desfacere—beneficiar. Fondurile financiare plătite de beneficiar băncii, în contul întreprinderii, sînt folosite pentru plata furnizorilor și retribuirea personalului. Fiecare din aceste fluxuri generează o circulație a informațiilor al căror flux este prezent la nivelul tuturor funcțiunilor întreprinderii. Dat fiind că întreaga activitate a întreprinderii este reflectată în aceste informații, întreprinderea poate fi analizată prin prisma sistemului său informațional.

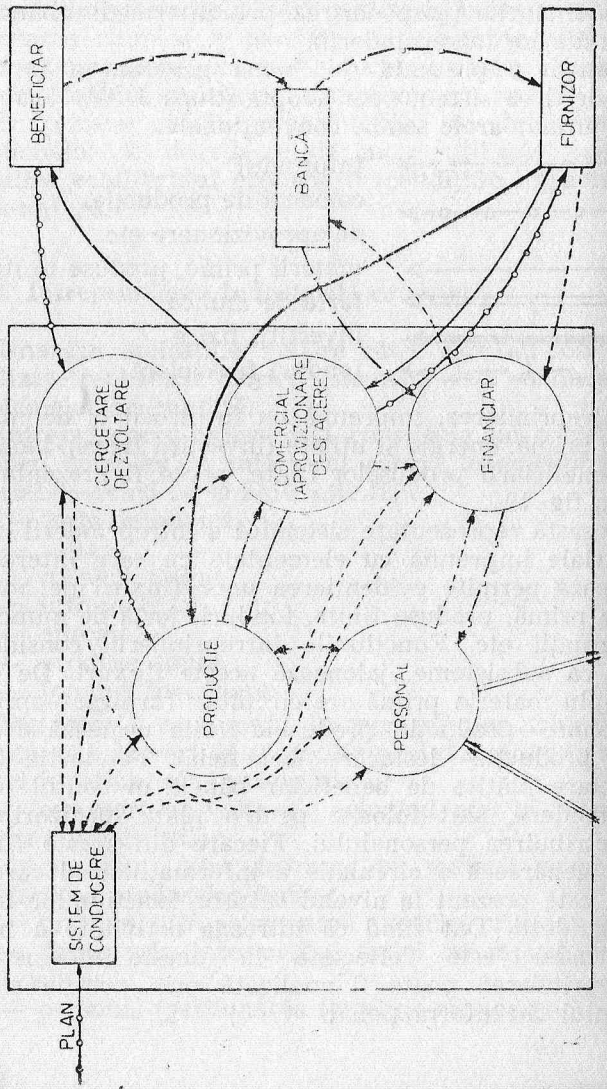


Fig. 19.

Funcțiunea (subsistemul) de producție realizează ansamblul obiectivelor întreprinderii. Din acest motiv conducerea acestui subsistem ocupă locul central în conducerea întreprinderii.

Factorii decizionali care conduc fiecare subsistem precum și regulile (algoritmii) de decizie alcătuiesc sistemul de conducere a întreprinderii. Se impune însă precizarea că întreprinderea nu poate fi considerată ca un sistem automat. Complexitatea ei ca sistem și varietatea extremă a interacțiunilor cu mediul nu permit stabilirea apriorică a tuturor regulilor de decizie. O parte din ele, așa-numitele „decizii programabile" pot fi încredințate calculatorului electronic. Deciziile generale care vizează ansamblul funcționării întreprinderii comportă o tratare nuanțată și luarea în considerare a unor factori care nu se pretează formalizării matematice riguroase.

4.3.1. *Sistem informațional, sistem informatic*

Conducerea proceselor care au loc la nivelele macro și microeconomice, adaptarea lor la schimbările mediului ambiant presupune existența unui sistem informațional care să cuprindă toate sectoarele de activitate.

Prin *sistem informațional* se înțelege întregul complex de activități care înregistrează informații, care le prelucrează, utilizîndu-le pentru realizarea obiectivelor întreprinderii. Prin urmare, sistemul informațional cuprinde toate procesele de prelucrare a informațiilor.

Informația constituie suportul esențial al conducerii. La nivelul conducerii strategice și tactice a unităților economice, informația este necesară atît pentru formularea strategiei de realizare a obiectivelor, cît și pentru verificarea traducerii ei în viață;

la nivelul conducerii operative, informația este necesară pentru planificarea detaliată și pentru aprecierea performanțelor.

Datorită acestui rol esențial al informației de conducere fie că e vorba de conducerea unei singure variabile, de conducerea unui proces, a unei întreprinderi, centrale sau chiar a economiei naționale — calculatorul reprezintă un instrument indispensabil: caracteristica principală a unui sistem de conducere bazat pe calculatoarele electronice este capacitatea lui de a colecta, asimila, analiza și difuza cantități mari de informație cu o mare viteză, precizie și suplețe. Prin urmare, după cum se utilizează dispozitivele menite să ușureze prelucrarea materialelor și transmiterea energiei, tot astfel calculatorul își ocupă locul ca un dispozitiv modern destinat să faciliteze prelucrarea informației economice.

Dacă în cadrul unui sistem informațional predomină ca echipament mijloacele de automatizare bazate pe calculatorul electronic, aceasta se va numi *sistem informatic.*

Din punct de vedere al relațiilor dintre calculator și procesul economic condus, există mai multe tipuri de configurații posibile, corespunzătoare exigenței impuse de natura și obiectivele fiecărui proces în parte. În acest context se disting două regimuri de funcționare ale unui sistem informatic (fig. 20) și anume:

— regimul *„off-line"* în care datele privind evoluția procesului ajung la calculator prin mijlocirea omului (linia întreruptă din fig. 20, *a*);

— regimul *„on-line"* la care datele referitoare la proces sînt transmise automat direct calculatorului (liniile continue din fig. 20 *a* și *b*); în acest regim, din punct de vedere al întoarcerii rezultatelor către

proces sub formă de comenzi, se disting două modalități și anume: în *circuit deschis,* cînd acestea sînt transmise procesului după o analiză și interpretare prealabilă de către om (linia întreruptă din fig. 20, *b*) și în *circuit închis* (linia continuă din

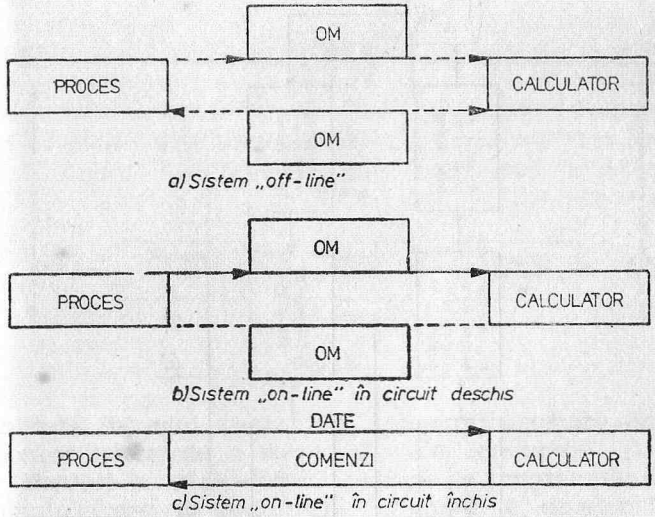


Fig. 20.

fig. 20, *c*) cînd se efectuează comanda procesului nemijlocit de către calculator.

În fluxul lor de la proces la calculator și de la calculator înapoi la proces, informația suportă operațiuni de manevră și prelucrare, denumite *proceduri.* Aceste proceduri pot fi automatizate în care caz sînt utilizate echipamente de calcul și programe scrise în limbajele de programare ale calculatorului electronic sau sînt executate manual, în cazul sistemelor informatice mai puțin evoluate.

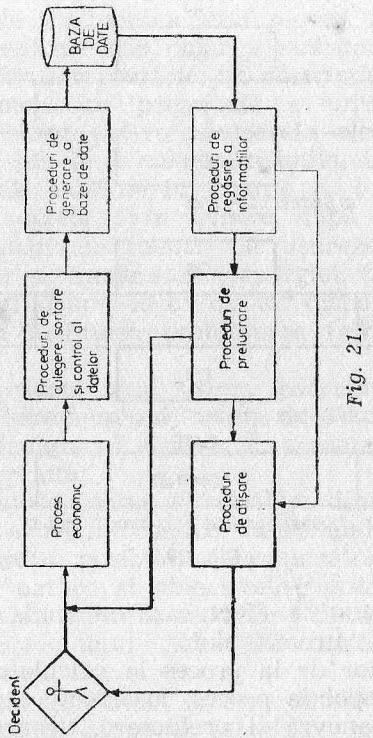


Fig. 21.

În fig. 21 sînt redate principalele proceduri care compun un sistem informatic modern pentru conducerea producției în unitățile economice.

Un loc central în cadrul sistemului informatic îl ocupă *baza de date* care centralizează după principii

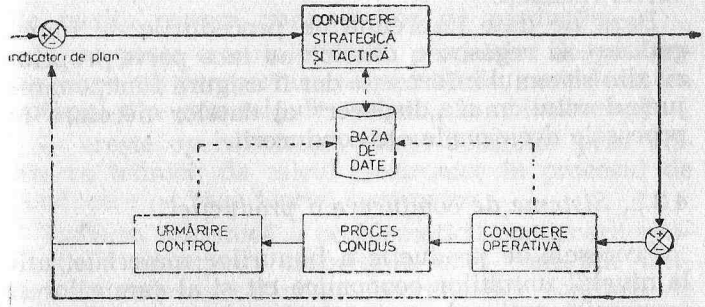


Fig. 22.

unitare întregul volum de informații necesare elaborării automate a comenzilor de conducere.

Deseori baza de date împreună cu programele de administrare și prelucrare automată a datelor în cadrul unui sistem informatic poartă denumirea de bancă de date.

O concepție originală asupra sistemelor informatice de conducere[32] prezintă sistemul informatic ca sistem cu două bucle de feedback evidențiate în fig. 22.

Subsistemul conducerii strategice și tactice are ca intrare diferența dintre indicatorii planificați și cei realizați și ca ieșire planul pe termen lung și mediu. Subsistemul conducerii operative are ca intrare

[32] P. CONSTANTINESCU, C. V. NEGOIȚĂ, *op. cit.*

diferența dintre planul pe termen lung și mediu și gradul său de realizare, iar ca ieșire planul pe termen scurt (programul de producție). Subsistemul proces condus primește programul de producție și realizează ca ieșire producția efectivă care este tradusă de subsistemul de urmărire—control în indicatori realizați.

Baza de date împreună cu procedurile de înmaganizare și regăsire a datelor nu face parte propriuzis din sistemul informatic dar îi asigură funcționarea jucînd rolul unui „dispecer" al datelor necesare în procesele decizionale ale conducerii.

4.3.2. *Sisteme de conducere a producției*

Procesele de producție a bunurilor materiale, atît la nivelul unităților economice cît și al ramurilor și economiei naționale, reprezintă sisteme complexe a căror conducere implică utilizarea conceptelor și instrumentelor elaborate în cadrul teoriei sistemelor.

Pentru realizarea atributelor conducerii proceselor din economia națională (previziune, organizare, coordonare, control etc.) în condițiile creșterii permanente a dimensiunii și complexității aparatului de producție, utilizarea metodelor empirice de decizie nu mai poate satisface cerințele obținerii unei eficiențe ridicate a actelor de decizie economică.

În acest context, formalizarea și modelarea funcționării proceselor de producție ca sisteme și recurgerea la metodele și tehnicile derivate din teoria sistemelor, constituie o sarcină de stringentă actualitate pentru conducerea științifică în acest domeniu.

Între avantajele abordării sistemice în îndeplinirea funcțiilor (atributelor) conducerii putem menționa:

— în elaborarea deciziilor devine posibilă surprinderea conexiunilor de ordin structural ale elementelor proceselor de producție;

— se poate ține seama de evoluția dinamică a parametrilor fizici și valorici ai producției;

— se facilitează determinarea influenței factorilor de mediu asupra parametrilor de producție;

— se poate orienta evoluția proceselor de producție către un comportament prestabilit considerat ca optimal din punctele de vedere ale obiectivelor;

— crește operativitatea luării deciziilor prin utilizarea tehnicii de calcul electronice în procesul de conducere pe baza teoriei sistemelor.

Tratarea sistemică a problematicii conducerii producției[33] presupune elaborarea unei concepții unitare în vederea extinderii procedurilor concrete de lucru în diverse domenii ale economiei naționale. Existența unei astfel de concepții este posibilă datorită caracterului unitar al activității de conducere în toate domeniile economiei naționale, indiferent de treapta ierarhică la care ne referim.

În cadrul concepției unitare de abordare sistemică a conducerii proceselor de producție o contribuție însemnată se poate aduce prin elaborarea conceptelor și a metodologiei în vederea utilizării concrete a metodelor teoriei sistemelor la nivelul unităților economice din țara noastră.

Un rezultat esențial în acest cadru este obținerea unei scheme unitare pentru conducerea prin plan a unităților economice, redată în fig. 23 (reprodusă după N. Andrei, *Model de urmărire*, comunicare la seminarul de teoria sistemelor, ASE, dec. 1974).

[33] ION POPESCU, *Teorie și practică în analiza sistemelor de conducere*, Ed. „Scrisul Românesc", Craiova, 1977.

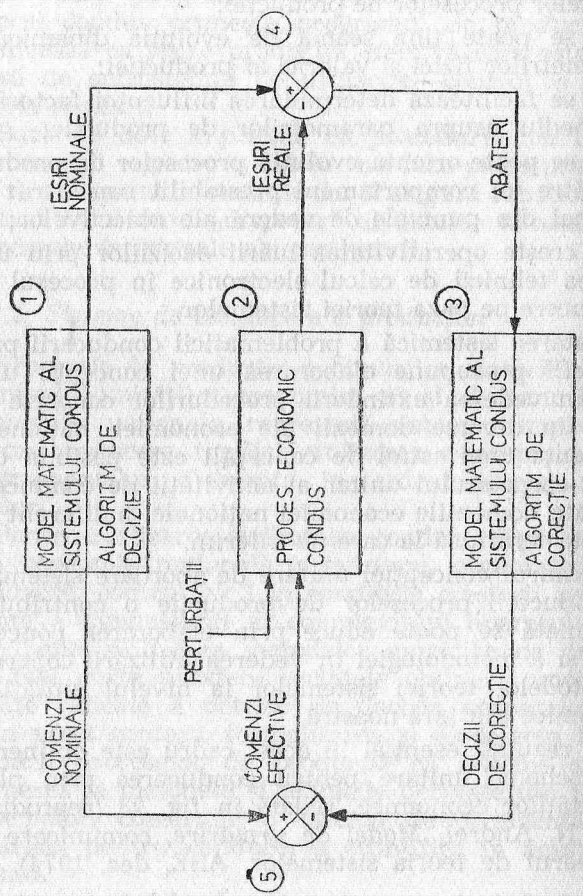


Fig. 23.

Cu ajutorul acestei scheme, vom dezvolta în continuare problematica conducerii prin plan a proceselor de producție.

În blocul nr. 1, denumit bloc de comandă, sînt prezente două elemente și anume:

— modelul matematic al procesului condus, care are rolul de a surprinde conexiunea spațio-temporală a parametrilor ce descriu evoluția procesului de producție 2. Acest model are rolul de a surprinde numai conexiunile esențiale, deci reprezintă o abstractizare a realității economice. El este compus de regulă din mai multe tipuri de relații matematice ce au rolul să surprindă: evoluția în timp a procesului (ecuații de dinamică sau de stare), condițiile interne de desfășurare (restricții sau relații tehnologice) și condițiile externe (relații de aprovizionare și desfacere) ce au rolul de a conecta procesul de producție la evenimentele din mediul înconjurător. La aceste relații se adaugă și cerințele de comportament optimal al procesului de producție sub forma funcției obiectiv sau a funcționalei de performanță. Aceasta are rolul ca din mulțimea variantelor de comportament definite prin relațiile de dinamică și restricțiile interne și externe să fie aleasă acea variantă ce corespunde realizării maximale a obiectivelor propuse.

Ca funcționale de performanță în cazul proceselor de producție se aleg indicatorii economici prevăzuți în metodologia de planificare.

Sinteza traiectoriei optimale se execută cu ajutorul metodelor și algoritmilor furnizați de teoria sistemelor, care sînt încorporate în pachete de programe de firmă performante din punct de vedere al vitezei de calcul.

În cazul unei abordări dinamice a comportării procesului de producție, o variantă care îndeplinește

condiţiile dinamice interne şi externe şi optimizează funcţionala de performanţă se numeşte traiectorie optimală. Datorită faptului că sinteza traiectoriei optimale se produce corespunzător parametrilor nominali de funcţionare ai procesului de producţie, aceasta se mai numeşte şi traiectorie nominală. Ea nu ţine seama de perturbaţiile ce apar în realitate în procesul condus. Din acest motiv traiectoria efectivă (reală) a procesului de producţie nu corespunde în general cu traiectoria nominală şi apar abaterile evidenţiate în cadrul blocului de comparare nr. 4 din fig. 23.

Nivelul abaterilor dintre traiectoria nominală şi cea efectivă reflectă capacitatea modelului matematic de a surprinde evenimentele ce se produc în cursul procesului de producţie în cadrul perioadei de plan şi reprezintă un criteriu esenţial pentru evaluarea eficienţei deciziei de conducere.

Prelucrarea abaterilor de la traiectoria nominală formează obiectul blocului nr. 3, denumit bloc de control. Funcţionarea acestui bloc este bazată pe ipoteza că abaterile urmează aceleaşi legi de evoluţie cu ale procesului de producţie însuşi. Din acest motiv blocul de control reproduce modelul matematic al procesului condus, cu deosebirea că funcţionala de performanţă urmăreşte elaborarea unei corecţii a traiectoriei nominale care să corespundă minimizării abaterilor de-alungul perioadei de plan.

Pe această cale, decizia efectivă de conducere ce se elaborează în cadrul blocului nr. 5, rezultă prin compunerea deciziei nominale şi a deciziei de corecţie furnizate de blocul de control.

În acest mod, decizia de conducere ţine seama şi de factorii de influenţă ce nu pot fi prevăzuţi de către modelul matematic, orientînd astfel procesul

de producţie spre un comportament ce îmbină exigenţele ideale formulate prin model, cu condiţiile reale de evoluţie.

4.4. Alte aplicaţii ale teoriei sistemelor în economie şi ştiinţele sociale

Funcţionarea ramurilor economice, a economiilor naţionale sau a sistemului economic mondial a constituit obiect al abordărilor sistemice încă de la cristalizarea primelor concepte ale teoriei sistemelor. O vastă literatură economico-matematică, avînd ca obiect conducerea şi planificarea economiei la diverse nivele, a apărut în ultimii ani. Nu se mai poate vorbi despre conducerea ştiinţifică a societăţii şi economiei făcînd abstracţie de teoria sistemelor, de modelarea matematică şi de posibilităţile pe care le oferă tehnica de calcul. Un sistem atît de complex cum este cel al economiei naţionale trebuie să fie modelat ţinînd seama de un număr mare de variabile şi de relaţii. Caracterul său de sistem închis (cu feedback) se menţine, dar intrările nu mai depind doar de stări şi ieşiri ci şi de influenţe exterioare sistemului, ca, de exemplu, conjunctura comerţului exterior. Exprimarea populaţiei ocupate printr-o singură variabilă de stare nu este posibilă, deoarece în expresia venitului naţional ca funcţie de producţie intervine numai populaţia ocupată în sfera productivă. Venitul naţional, pe de altă parte, nu este numai rezultatul interacţiunii forţei de muncă cu fondurile fixe, ci şi al progresului tehnic care va constitui o altă stare, dependentă, la rîndul ei, de fracţiunea din venitul naţional alocată pentru introducerea progresului tehnic (cercetare ştiinţifică şi dezvoltare tehnologică).

Un model al dezvoltării economico-sociale[34], reprodus în fig. 24 pune în evidență rolul progresului tehnic (văzut ca una din componentele modului de inovare) ca feedback al producției materiale.

Modul de inovare nu trebuie înțeles doar sub aspectul său tehnologic. Societatea ca sistem dina-

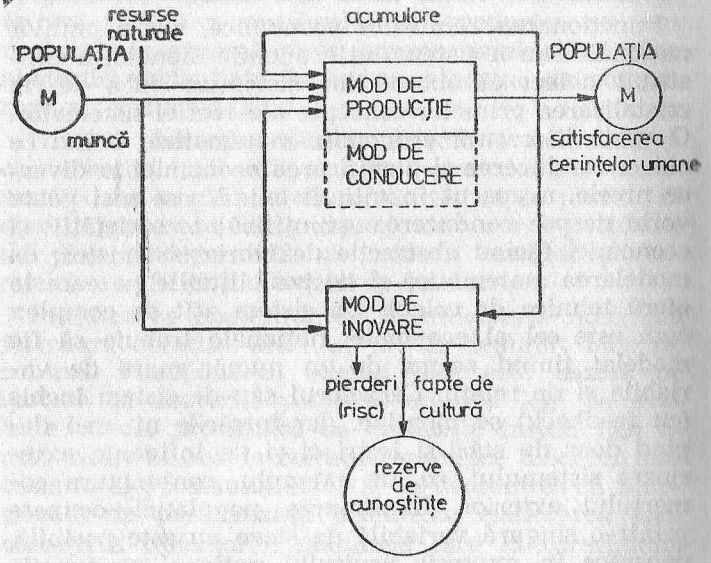


Fig. 24.

mic constituie suportul permanent al unor schimbări care cuprind, alături de inovarea tehnologică și înnoiri ale altor aspecte privind viața socială. Totalitatea proceselor de inovare formează modul de

[34] După M. DRĂGĂNESCU, *op. cit.*, p. 64.

inovare care acționează asupra modului de producție. Creșterea economică este condiționată de acumulare și de inovare, ambele constituind mărimi de feedback pozitiv.

Aspectele de ordin calitativ ale proceselor și fenomenelor sociale prezintă un grad mai ridicat de dificultate pentru încadrarea lor în concepte ale teoriei sistemelor. Complexitatea sistemelor luate în discuție conturează însă o direcție necesară (și, de ce nu, *posibilă?)* de dezvoltare a teoriei sistemelor. Nu lipsesc însă încercări notabile de a realiza redefiniri mai largi și aplicări ale aparatului actual al teoriei sistemelor în domeniul: formalizării analizelor sociologice[35], sociologiei științei[36], conducerii societății[37], perfecționării relațiilor sociale[38].

Poziția negativistă de contestare a aplicabilității teoriei sistemelor la sistemele care pot fi identificate la nivelul societății ar fi la fel de greșită ca reducționismul — de esență tehnocratică — cu pretenții de integrare a tuturor claselor de sisteme în cadrul furnizat de teoria sistemelor la nivelul ei actual de dezvoltare.

Experiența ratată a „darwinismului social" este un avertisment clar față de orice tentativă reducționistă. Este suficient să ne reamintim sistemul celor două specii zoologice aflate în competiție ca

[35] M. ȘILEȚKI, L. CURTA, *Modelarea matematică a proceselor sociale*, Ed. Academiei R.S.R., 1973; H. M. BLALOCK-jr., *Theory construction*, Prentice Hall Inc. New Jersey, 1969.

[36] N. S. DUMITRU, *Structura prospectivă și praxiologică a manifestărilor științifice* în vol. „Prognoza sociologică", Ed. Științifică, București, 1972.

[37] H. ENE, *Teoria reglării sistemelor sociale*, Ed. Academiei R.S.R., 1972.

[38] N. S. DUMITRU, *Sistem social, praxis, experiment*, Ed. Științifică, București, 1974.

să ne dăm seama că modelul respectiv este irelevant dacă l-am aplica unui sistem format din două întreprinderi industriale — din care una este furnizoarea celeilalte — sau sistemului schimburilor comerciale între două țări. Nu este mai puțin adevărat că și acestea din urmă beneficiază de imagini sistemice (adică modele) adecvate, dar bazate pe analize de sistem calitativ deosebite.

4.5. Teoria sistemelor: realizări, perspective, limite

Putem considera că teoria sistemelor a debutat ca un limbaj unitar de descriere a unor clase largi de sisteme: tehnice, biologice, microeconomice și chiar macroeconomice. O dată constituită ca atare, ea s-a dezvoltat puternic pe teritoriul științelor tehnice, primind contribuția masivă a matematicii. Această etapă i-a consolidat potențialul aplicativ, cu atît mai mult cu cît apariția și dezvoltarea tehnicii electronice de calcul a permis nașterea unei simbioze, devenită vîrf de lance al revoluției tehnico-științifice: teoria sistemelor — tehnica de calcul. Rapiditatea și eficiența cu care a fost aplicată teoria sistemelor în domeniul automaticii, explică apelul făcut de biologie — domeniu în care aplicarea teoriei sistemelor a avansat mai lent decît în tehnică — și de științele societății și omului la tehnicile și metodele specifice teoriei sistemelor. Aici s-au conturat două tendințe: *a*) tratarea pe cît posibil, a sistemelor biologice și sociale în cadrul actual al teoriei sistemelor și *b*) extinderea, generalizarea și chiar reformularea teoriei sistemelor astfel încît ea să fie aplicată *în mod real* sistemelor complexe care aparțin mediului biologic și social. A doua tendință este — opinează majoritatea specialiștilor — direcția majoră de dezvoltare a teoriei sistemelor. Confruntată cu o problematică din ce în ce mai largă, pe de o parte, și beneficiind de dezvoltarea rapidă a tehnicii de calcul și de impactul crescînd cu dezvoltarea altor științe, pe de altă parte este foarte probabil ca teoria sistemelor să aibă o evoluție accelerată, similară cu evoluția fizicii de la Newton la Einstein. Ceea ce caracterizează astăzi ansamblul preocupărilor în domeniul teoriei sistemelor este accelerarea circuitului: de la teorie la aplicații și prin aplicare la noi cuceriri teoretice. Acest drum dialectic face ca teoria sistemelor să constituie unul din modelele posibile ale dezvoltării științei.

CUPRINS

1. **Ce este teoria sistemelor?** 5
1.1. Originea teoriei sistemelor 5
1.2. Dialectica apariţiei teoriei sistemelor 12
1.3. Teoria sistemelor ca moment al istoriei ştiinţei . 15

2. **Noţiunile fundamentale ale teoriei sistemelor** . . 19
2.1. Definiţia sistemului 19
2.2. Sisteme deschise şi închise 28
2.3. Feedback negativ şi pozitiv 31
2.4. Sisteme continue, discrete şi hibride 33
2.5. Proprietăţile sistemelor 35
2.5.1. Proprietăţi externe 35
2.5.2. Proprietăţi interne 36
2.6. Spaţiul intrărilor, stărilor şi ieşirilor 39
2.7. Sisteme liniare 42
2.8. Sisteme ierarhizate 43
2.9 Sisteme deterministe şi nedeterministe, sisteme fuzzy 46
2.10. Sisteme automate 50
2.11. Problemele fundamentale ale teoriei sistemelor . 55
2.11.1. Analiza sistemelor 55
2.11.2. Sinteza sistemelor 57
2.11.3. Conducerea sistemelor 58

3. Sistem şi model 60

3.1. Metode de modelare a sistemelor 67
3.2. Utilizarea modelelor: simulare, prognoză optimizare 74
3.3. Rolul modelelor în analiza, sinteza şi conducerea sistemelor 76
3.4. Problematica sistemelor mari 78
3.5. Utilizarea tehnicii de calcul pentru simularea, prognoza şi optimizarea cu ajutorul modelelor . . . 81

4. Aplicaţiile teoriei sistemelor 84

4.1. Aplicaţii tehnice 86
4.2. Teoria sistemelor în biologie şi ecologie 87
4.3. Întreprinderea industrială ca sistem 90
4.3.1. Sistem informaţional, sistem informatic . . 93
4.3.2. Sistem de conducere a producţiei . . . 98
4.4. Alte aplicaţii ale teoriei sistemelor în economie şi ştiinţele sociale 103
4.5. Teoria sistemelor: realizări, perspective, limite . . 106

Coli de tipar: 3,50
Tirajul: 12 200 ex.
Bun de tipar: 2.03.1978

Întreprinderea Poligrafică Cluj,
Str. Brassai nr. 5—7,
Republica Socialistă România
Comanda nr. 584/1977

Teoria sistemelor a debutat ca un limbaj unitar de descriere a unor clase largi de sisteme: tehnice, biologice, microeconomice și chiar macroeconomice. Odată constituite ca atare, ea s-a dezvoltat puternic pe teritoriul științelor tehnice, privind contribuția masivă a matematicii.

Rapiditatea și eficiența cu care a fost aplicată teoria sistemelor în domeniul automaticii explică apelul făcut de biologie — domeniu în care aplicarea teoriei sistemelor a avansat mai lent decît în tehnică — și științele societății și omului la tehnicile și metodele specifice teoriei sistemelor.

Editura științifică și enciclopedică Lei — 2,60